

VŠB –Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Simulace a predikce napětí 3D tisku
kovových slitin technologií Powder Bed
Fusion**

Simulation and Prediction of 3D Printing
of Metallic Alloys using Powder Bed Fusion
Technology

Student:

Bc. Vladimír Ptáček

Vedoucí práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vladimír Ptáček**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: Simulace a predikce napětí 3D tisku kovových slitin technologií Powder Bed Fusion
Simulation and Prediction of 3D Printing of Metallic Alloys using Powder Bed Fusion Technology

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Současný stav.
3. Simulace 3D tisku a predikce napětí pomocí SW.
4. Technické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

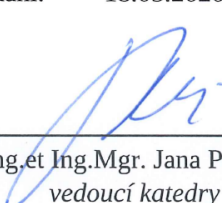
DOBBS, Sarah et al. SB LTD. *The Ultimate Guide To 3D Printing*. London: Dennis Publishing Ltd, 2014, 48 s. ISBN 1-78106-309-5.
GIBSON, I., D. W ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.
BATEMAN, Rob a Richard OLSSON. *The essential guide to 3D in Flash*. Berkeley. California: Friends of Ed, [2010]. ISBN 978-1-4302-2542-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou Diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne: 14. 5. 2020.

Podpis studenta



.....

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 14. 5. 2020



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Vladimír Ptáček

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Slavičín 76 321

Nad Výpustou 514

Poděkování:

Děkuji Ing. Markovi Pagáči, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při zpracování Diplomové práce.

Anotace diplomové práce

PTÁČEK, V. Simulace a predikce napětí 3D tisku kovových slitin technologií Powder Bed Fusion: *Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 70 s. Vedoucí práce Ing. Marek Pagáč, Ph.D.:

Diplomová práce je zaměřena na aditivní technologii výroby, a to zejména na slinování/spékání kovových prášků laserovým paprskem technologií Powder Bed Fusion. Tato technologie je dělena na další procesy dle použitého zdroje tepla. Diplomová práce se podrobněji zabývá procesem SLM (Selective Laser Melting) a je rozdělena na dvě části, teorii a experiment. Teoretická část obsahuje seznámení s dříve jmenovanou technologií. Experimentální část je podložena výpočtem napětí a deformace v 3D modelu pomocí počítačového programu. Pro zjištění vnitřních, zbytkových napětí byla kalibrována, laboratorními zkouškami, zkušební nerezová ocel 316L. Vzhledem k deformaci 3D modelu jsou přednastavené parametry ověřené simulací. Následně je provedeno změření deformace modelu a na základě výpočtu stanoveny nové rozměrové hodnoty modelu. Správnost nastavení a výpočtu je ověřena simulací 3D tisku. Výsledkem byl model s předdefinovanou geometrií, který byl připraven pro 3D tisk.

Diploma thesis annotation

PTÁČEK, V: Simulation and Prediction of 3D Printing of Metallic Alloys using Powder Bed Fusion Technology Diploma Thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology 2020, 70 p. Thesis head. Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

The diploma thesis is focused on additive production technology, especially on melting/sintering of metal powders by laser beam using Powder Bed Fusion technology. This technology is divided into other processes according to the heat source used. The diploma thesis deals in more detail with the SLM (Selective Laser Melting) process and is divided into two parts, theory and experiment. The theoretical part contains an introduction to the previously mentioned technology. The experimental part is based on the calculation of stress and strain in a 3D model using a computer program. To determine the internal, residual stresses, 316L stainless steel test material was calibrated by laboratory tests. Due to the deformation of the 3D model, the preset parameters are verified by simulation. Subsequently, the deformation of the model is measured and new dimensional values of the model are determined on the basis of the calculation. The correctness of the settings and calculation is verified by simulation of 3D printing. The result was a model with predefined geometry that was ready for 3D printing.

Použité zkratky a symboly.

3D	trojrozměrný	[-]
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	[-]
SLM	Selective Laser Melting	[-]
EBM	Electron Beam Melting (Tavení elektronovým paprskem)	[-]
AM	Additive manufacturing (Aditivní výroba)	[-]
CO₂	Oxid uhličitý	[-]
SLS	Selective Laser Sintering	[-]
SL	Sheet lamination (Laminování plechů)	[-]
BJ	Binder jetting (Tryskání pojiva)	[-]
DED	Direct Energy Deposition (Přímé energetické nanášení)	[-]
VAT	foto polymerace	[-]
FDM	Material extrusion – FDM (vytlačování materiálu)	[-]
MJ	Multi Jet Fusion	[-]
PBF	Powder Bed Fusion (spékání práškové vrstvy)	[-]
Cr	Chrom	[-]
Mo	Molybden	[-]
Mn	Magnezium (hořčík)	[-]
Si	Křemík	[-]
N	Dusík	[-]
O	Kyslík	[-]
P	Fosfor	[-]
S	Síra	[-]
Rp	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[MPa]
A	Tažnost	[-]
AISI	American Iron and Steel Institute	[-]
DIN	Deutsches Institut für Normung	[-]
STL	Standard Triangle Language	[-]
XML	Extensible Markup Language	[-]

CLIP	Continuous Liquid Interface Production [-] (kontinuální výroba v kapalinovém rozhraní)
CO₂	Oxid uhličitý [-]
HIP	Hot Isostatic Pressing (horké izostatické lisování) [-]
EDM	Elektroerozivní obrábění [-]
DLP	Digital Light Processing (přímé zpracování světla) [-]
SLA	Stereolitografie [-]

Obsah

1. Úvod	12
2. Současný stav	14
2.1. Historie technologie aditivní výroby	14
2.2. Dělení technologie aditivní výroby	14
2.2.1. Fotopolymerace (VAT Photopolymerization).....	16
2.2.2. Vytlačování materiálu (Material extrusion – FDM).....	16
2.2.3. Material Jetting MJ (Tryskání materiálu).....	17
2.2.4. Laminování plátů (Sheet Lamination SL)	18
2.2.5. Tryskání pojiva (Binder Jetting BJ)	18
2.2.6. Přímé energetické nanášení (Direct Energy Deposition DED).....	19
2.2.7. Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion PBF).....	20
3. Zbytkové vnitřní napětí	28
3.1. Dělení napětí.....	28
3.2. Teplotní mechanismy.....	29
3.3. Optimalizační počítačový program	30
3.4. Měření napětí	31
3.5. Orientace součásti	31
3.6. Podpůrné struktury.....	32
3.7. Tloušťka vrstvy	34
3.8. Kalibrace v programu Simufact Additive	35
3.8.1. Postup kalibrace	36
3.8.2. Kalibrační formulář	39
3.9. Programování a simulace Simufact Additive	40
3.9.1. Topologická optimalizace	40
3.9.2. Zadaný model	40

3.9.3.	Vstupní materiál	41
3.9.4.	Použitá tiskárna	42
3.9.5.	Popis simulace programu	43
3.9.6.	Post – processing v programu	54
3.10.	Post-Processing (dokončovací operace)	56
3.10.1.	Tepelné zpracování.....	56
3.10.2.	Otryskávání.....	56
3.10.3.	Omílání	56
4.	Technické zhodnocení.....	57
5.	Závěr.....	61
6.	Použitá Literatura	64
7.	Použité obrázky	68
8.	Tabulky	70

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá 3D tiskem kovů, se zaměřením na simulaci a predikci napětí. V posledních letech je slyšet o problematice 3D tisku čím dál více, a to hlavně zásluhou internetových médií. Mnozí hovoří o další technické či průmyslové revoluci, kterou tato technologie může přinést.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou část a část experimentální. V teoretické části jsou popsány technologie aditivní výroby 3D tisku Powder Bed Fusion, která je rozdělena dle druhu zdroje tepla na procesy MJF (Multi Jet Fusion), SLS (Selective Laser Sintering), EBM (Electron Beam Melting) a DMLS/SLM (Direct Metal Laser Sintering/Selective Laser Melting).

Proces MJF (Multi Jet Fusion) používá k 3D tisku plastových granulí a k natavení tiskařské činidlo a tepelnou energii. Proces SLS (Selective Laser Sintering) využívá k natavení laser, a rovněž tiskne plastové výrobky. Ostatní procesy využívají k tisku kovových prášků, liší se druhem použitého paprsku. V případě metody DMLS/SLM (Direct metal laser Sintering/Selective Laser Melting) je materiál natavován pomocí laseru, u EBM (Electron Beam Melting) je paprsek elektronový.

Experimentální část je zaměřena na vnitřní napětí výrobku u 3D tisku, stanovení velikosti deformace a jejího vlivu na model pro 3D tisk. Experiment obsahuje kalibraci zvoleného nerezového materiálu, oceli 316L, s následným zjišťováním parametrů vnitřního napětí a zrnitosti daného materiálu. Součástí je rovněž nastavení programu Simufact Additive dle zadaného stroje od společnosti Ranishaw a dalších procesních parametrů pro stroj a použitý materiál k 3D tisku. Výchozí 3D model je zhotoven v programu Autodesk Inventor. Společně s kalibračním protokolem zvoleného materiálu 316L jsou vloženy do programu Simufact Additive a následně proběhne simulace a výpočet hodnot. Výsledkem je simulace, výpočtem zjištěna velikost vnitřního napětí a stanovení velikosti deformace. Následuje vložení konečného, upraveného 3D modelu pro tisk tak, aby výsledný výrobek zcela odpovídal výkresové dokumentaci.

Technologie 3D tisku si v dnešní době již vydobyla své pozice v různých odvětvích průmyslu a stala se tak nezastupitelnou a velmi atraktivní, výrobní metodou. Zatímco ještě do nedávna kralovaly v oblasti 3D tisku plastové výrobky, dnes se rapidně zvyšuje podíl kovových součástí. Aditivní výroba je přijímána ve všech odvětvích, je osvědčeným nástrojem pro výrobu prototypů, kloubních a dentálních náhrad, nástrojů, forem s konformním chlazením, odlehčených struktur v leteckém a automobilovém průmyslu atd. Výrobky dostávají zajímavý moderní vzhled s charakteristickým lehkým kovovým rámem.

2. Současný stav

2.1. Historie technologie aditivní výroby

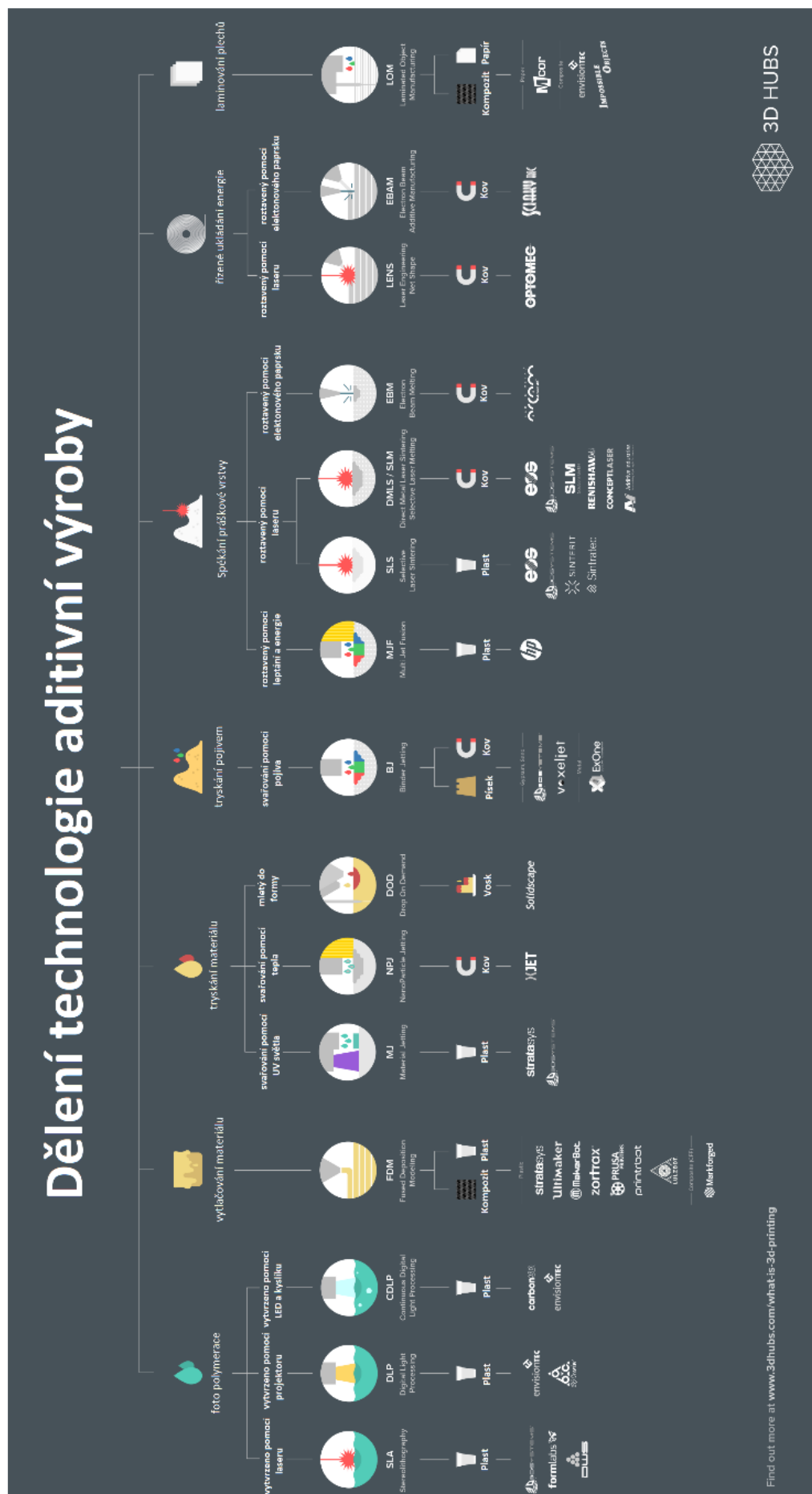
V roce 1984 nechal Charles Hull patentovat technologii zvanou stereolitografie. Patent byl roku 1986 schválen a prakticky hned vzápětí byla Charlesem Hullem založena firma 3D Systems. První zařízení, které dokázalo pomocí 3D tisku vyrábět objekty, bylo označeno jako SLA-1. Pro své vysoké náklady bylo toto zřízení využíváno pouze úzkým okruhem uživatelů a na základě jejich zkušeností byl tento typ rychle postupně vyvíjen. Až model SLA 250 byl v roce 1988 nabídnut široké veřejnosti. Vývoj typové řady SLA i nadále pokračoval a není bez zajímavosti, že do roku 1996 bylo prodáno více než 600 různých SLA přístrojů po celém světě. [1]

2.2. Dělení technologie aditivní výroby

Technologie 3D tisku označuje procesy používané ke generování 3D objektu, ve kterém se vrstvy materiálu postupně vytvářejí v rámci počítačem řízeného programu k vytvoření fyzického objektu. Zdroj 3D souboru je obvykle rozdělen do několika vrstev, přičemž každá vrstva generuje sadu instrukcí řízených počítačem. Jak 3D tisk, tak výroba aditiv odrážejí, že technologie sdílejí téma přidávání nebo spojování materiálu v rámci celé 3D práce. Technologie 3D tisku lze rozdělit do dvou skupin: přímý a nepřímý 3D tisk. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že návrh je vytvořen přímo z 3D tisku (přímý) nebo 3D tisk byl použit v procesu vytváření modelu (nepřímý). Kovový 3D tisk byl k dispozici teprve v 90. letech s vynálezem technik laserového tavení a slinování. Selektivní laserové slinování (SLS) a selektivní laserové tání (SLM) jsou často seskupeny pod zastřešujícím termínem Direct Metal Laser Sintering (DMLS). ISO / ASTM52900-15 definuje sedm kategorií procesů aditivní výroby (AM):

- vytlačování materiálu,
- foto polymerace,
- spékání práškové vrstvy,
- tryskání materiálu,
- tryskání pojivem,
- laminování plechů,
- přímé energetické nanášení (viz. obr. 2.1). [2,3]

Dělení technologie aditivní výroby

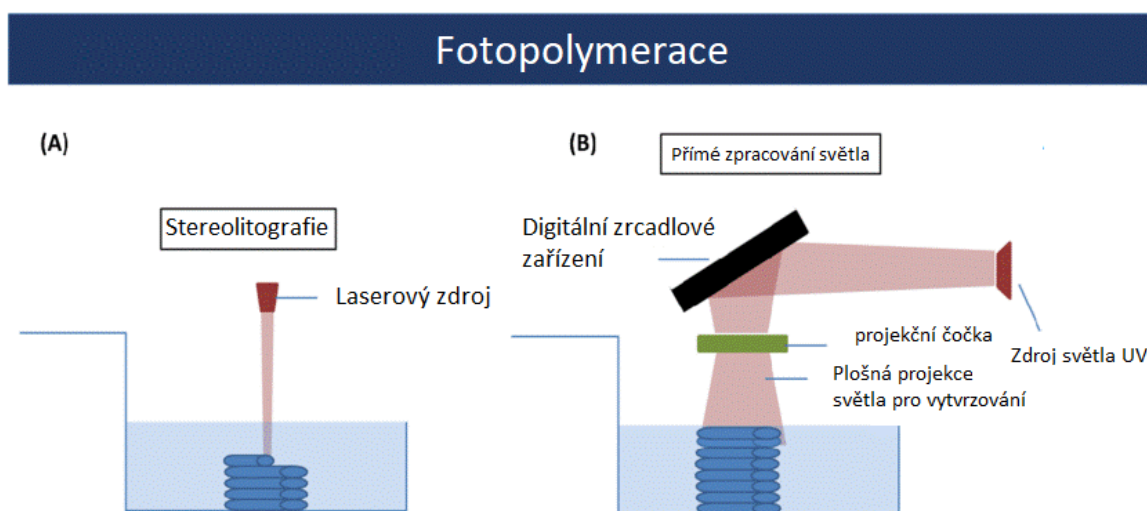


Obrázek 2.1 – Dělení technologie aditivní výroby¹⁷

2.2.1. Fotopolymerace (VAT Photopolymerization)

Fotopolymerace je technologie aditivní výroby (AM), která vytváří 3D objekty selektivním vytvrzováním kapalně pryskyřice pomocí cílené polymerace, která je aktivovaná světlem. Stereolitografie (SLA), první proces AM, který byl patentován a komercializován, je technikou fotopolymerizace v nádobě. Od 80. let minulého století se fotopolymerace rozrostla také na kontinuální výrobu v kapalinovém rozhraní (CLIP) a přímé zpracování světla (DLP).[25]

Všechny typy fotopolymerace pracují s tiskovým materiálem, jako jsou speciální pryskyřice zvané fotopolymery. Při vystavení specifickým vlnovým délkám světla se molekuly kapalných fotopolymerů rychle spojí a vytvrzují do pevného stavu. Tento proces se nazývá fotopolymerace. (viz. obr. 2.2) [4]

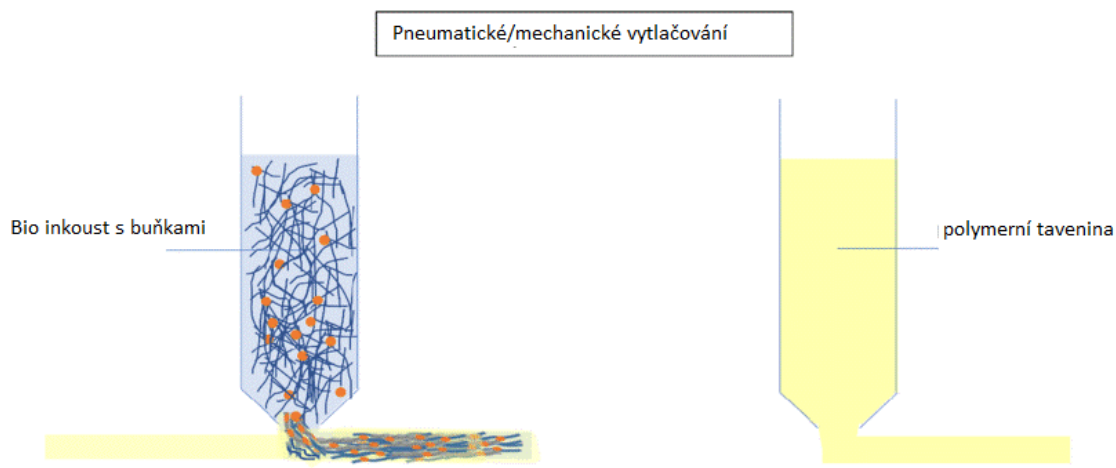


Obrázek 2.2. - A) Stereolitografie. B) Digitální zpracování světla²⁸

2.2.2. Vytlačování materiálu (Material extrusion – FDM)

Technologie vytlačování materiálu používá ke konstrukci 3D modelu kontinuální vlákno z termoplastického materiálu. Vlákno je přiváděno z cívky přes pohybující se vyhřívanou vytlačovací hlavu tiskárny. Roztavený materiál je vytlačen z trysky vytlačovacího stroje, poté je nanášen na základní desku a skládán vrstvu po vrstvě na sebe. Materiál může být vytlačován mechanicky nebo pneumaticky. Nejatraktivnější použití je ve zdravotnictví (viz. obr. 2.3). [4,26]

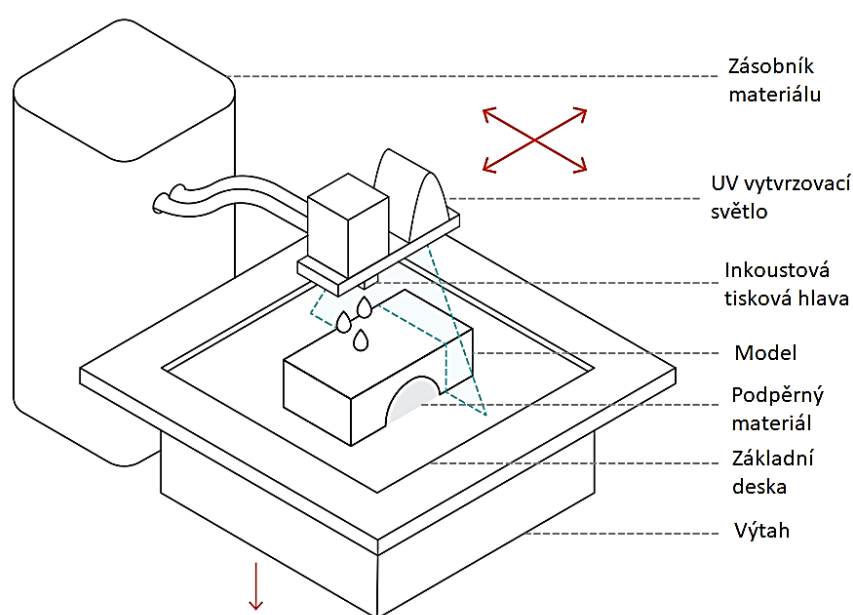
Vytlačování materiálu



Obrázek 2.3 - Vytlačování materiálu²⁸

2.2.3. Material Jetting MJ (Tryskání materiálu)

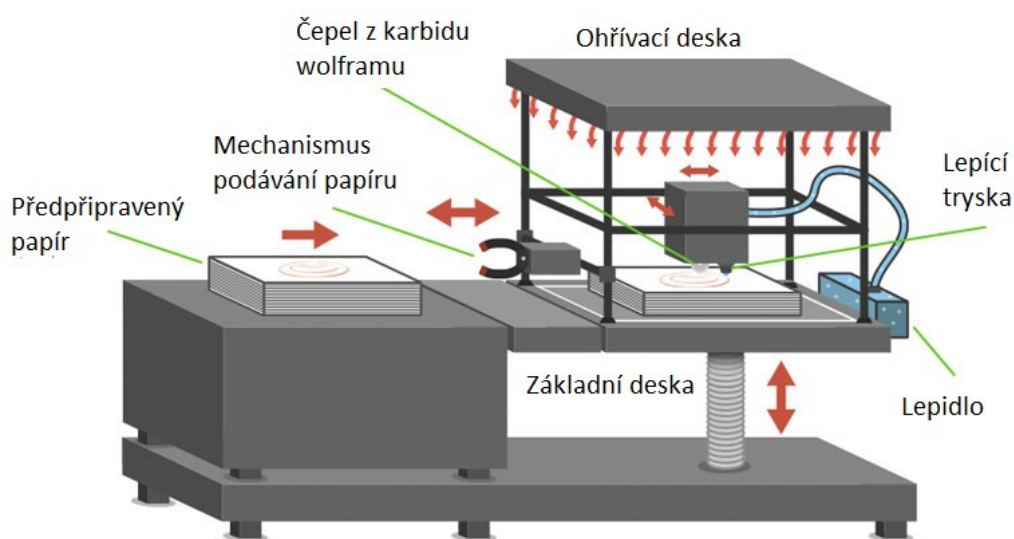
Technika výroby 3D tisku materiálu tryskáním je často srovnávána se standardním procesem 2D tryskání inkoustem. Použití fotopolymerů, kovů nebo vosků, které tuhnou, když jsou vystaveny světlu nebo teple (podobně jako stereolitografie), zajišťuje, že vytisknuté modely jsou vytvářeny po jedné vrstvě najednou (viz. obr. 2.4). Výrobní proces tryskání materiálu umožňuje na rozdíl od většiny ostatních technologií 3D tisku tisknout různými materiály. To je umožněno připojením více tiskových hlav ke stejnému nosiči vedle sebe. [4,27]



Obrázek 2.4 - Schéma tiskárny tryskání materiálu²⁷

2.2.4. Laminování plátů (Sheet Lamination SL)

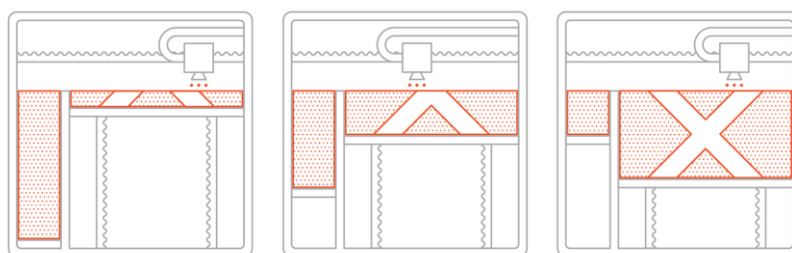
Technika 3D tisku na laminování plátů se používá hlavně k výrobě barevných předmětů ve vysokém detailním rozlišení. Na materiál jsou použity tenké vrstvené materiály, jako je hliníková fólie nebo papírové listy. Pláty jsou následně rozřezány na vhodně tvarované vrstvy, často jsou řezány lasery nebo velmi ostrým nožem. Vrstvy jsou potaženy lepidlem a postupně lepeny po vrstvách (viz. obr. 2.5). Přesnost výsledku pak závisí hlavně na tloušťce použitých materiálů. Předměty, které jsou tištěny touto technikou, mohou být dodatečně upraveny obráběním nebo vrtáním po dokončení procesu tisku. [2,29]



Obrázek 2.5 – Schéma tiskárny na laminování plátů²⁹

2.2.5. Tryskání pojiva (Binder Jetting BJ)

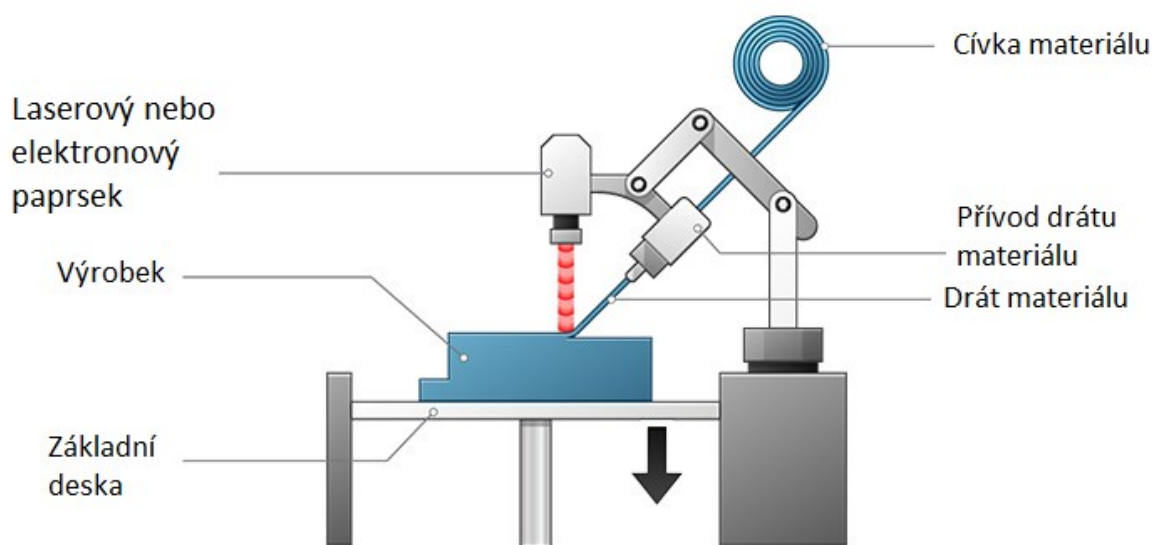
Technika tryskání 3D pojivem vychází z podstaty nanesení pojiva pomocí štěrbinové čepele na tenké vrstvy práškového materiálu na práškové lože. Následně se tiskací hlava posouvá po základní desce a nanáší kapky pojiva, vznikne první vrstva. Když je vrstva kompletní, základní deska se pohne dolů a proces se pak opakuje (viz. obr. 2.6). Běžné práškové materiály jsou kovy, písek a keramika, které přicházejí ve formě prášku. [4,27].



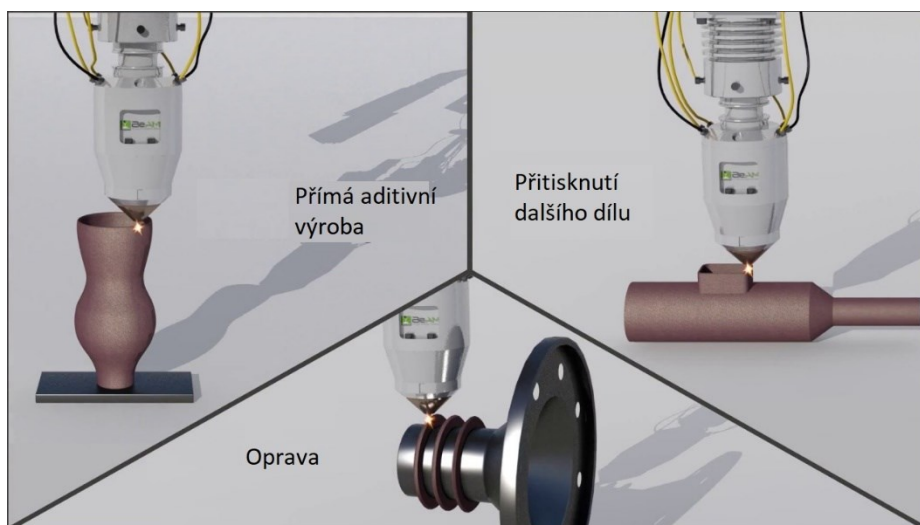
Obrázek 2.6 – Schéma principu tisku tryskání pojiva²⁷

2.2.6. Přímé energetické nanášení (Direct Energy Deposition DED)

Řízené ukládání energie vytváří součásti přímým tavením materiálů nebo jejich natavováním na obrobek, vrstvu po vrstvě (viz. obr. 2.7). Základní materiál je dodáván ve formě prášku nebo drátu. Tato technologie 3D tisku se většinou používá k opravě nebo přidání dalšího materiálu ke stávajícím komponentům (viz. obr. 2.8). Často se používá pro průmyslové aplikace, jako je oprava poškozených lopatek turbíny nebo vrtulí. [4,30]



Obrázek 2.7 – Schéma tiskárny na řízené ukládání energie³⁰



Obrázek 2.8 – Použití technologie DED³⁴

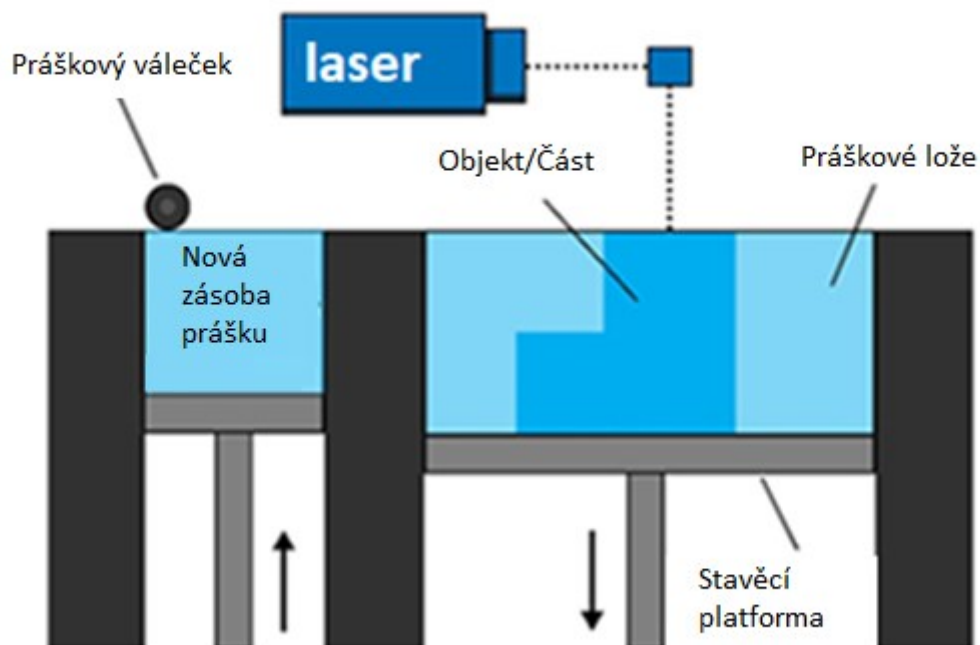
2.2.7. Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion PBF)

Powder Bed Fusion je rozdělen na následující tiskové procesy:

- tavení elektronovým paprskem (EBM),
- selektivní laserové tavení (SLM),
- selektivní laserové slinování (SLS). [4]

Metoda Spékání práškové vrstvy (PBF) používá k slinutí a roztavení práškového materiálu laserový nebo elektronový paprsek (viz. obr. 2.9).[4]

Technologie spékání práškové vrstvy je výhodná při výrobě přesahů a dolů směřujících povrchů (viz obr. 2.10). Nevýhodou je teplota laserového či elektronového paprsku, které přivádějí do tisknutého modelu velké teplo, které může způsobit velkou koncentraci vnitřního pnutí nebo deformace. Důležitá je orientace modelu pro 3D tisk, aby se snížila koncentrace vniknutého tepla. Z toho vyplývá, že model se nemusí nutně tisknout v ose Z směrem nahoru. [30]



Obrázek 2.9 - Powder Bed Fusion⁴

Mezi další výhody technologie spékání práškové vrstvy (PBF) patří:

- **možnost podpěr** – tisknutí modelů s velkými převisy,
- **použití různých materiálů** – např: keramika, sklo, plast, kov a kovové slitiny,
- **recyklace prášku**. [31]

Mezi některé nevýhody technologie spékání práškové vrstvy patří:

- **pomalý a dlouhý čas tisku** – tato technologie patří mezi časově nejdelší procesy,
- **drsnost povrchu** – velká zrnitost prášku a ukládání po vrstvách způsobuje velkou drsnost povrchu, výrobek se musí dále opracovávat,
- **přilnavý povrch základní desky** – na povrchu desky ulpí zbytek materiálu od 3D tisku, vždy následuje opracování povrchu frézováním a broušením,
- **deformace způsobená zbytkovým vnitřním napětím** – působení laserového nebo elektronového paprsku s následným ochlazením,
- **vysoká spotřeba energie** – predehřev komory a docílení potřebné intenzity laserového nebo elektronového paprsku. [31]



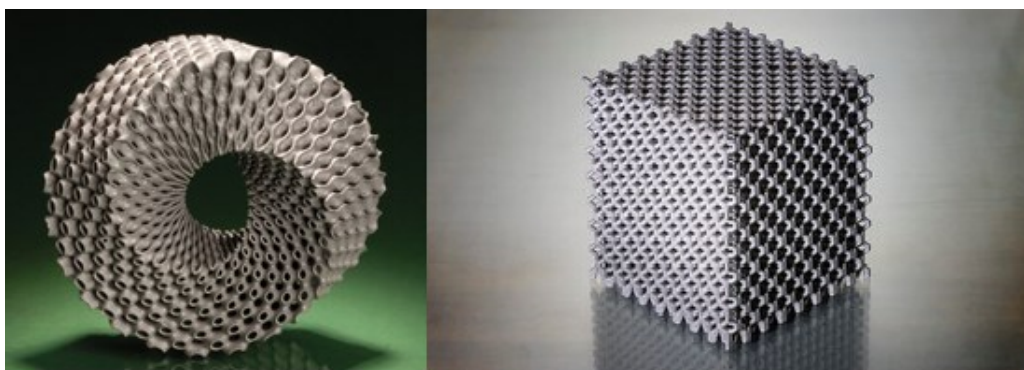
Obrázek 2.10 - Ukázka výroby s přesahem³⁵

Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting SLM)

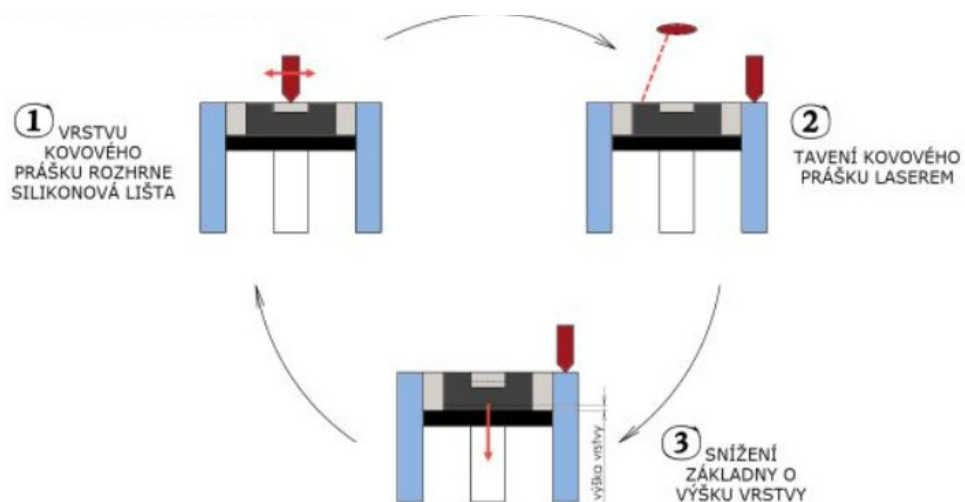
Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting SLM) je proces patřící do technologie aditivní výroby (AM) spékání práškové vrstvy (PBF), která umožňuje přímou výrobu trojrozměrných kovových součástí vrstvu po vrstvě. Pomocí CO₂ laseru, který nataví kovový prášek, mohou být vytisknuty modely složitých tvarů (viz. obr.2.11), které by se konvenčními výrobními procesy nedaly vyrobit. Zároveň výrobky z procesu SLM mají srovnatelné, ba dokonce lepší mechanické vlastnosti, než obrobky vyrobené běžnými výrobními procesy. [5;6]

Princip procesu

Technologie pracuje na základě 3D CAD modelu. Model je nejprve rozložen na tenké vrstvy a pro každou vrstvu je vygenerována dráha laseru. Takto připravená data jsou převedena do 3D tiskárny, kde jsou navoleny procesní parametry, jako např.: výkon, rychlost laseru, tloušťka vrstvy a nespočet dalších potřebných parametrů. Na základní desku se pak postupně nanáší jednotlivé vrstvy prášku o stejných vrstvách. Po nanesení každé vrstvy prášku následuje pohyb paprsku CO₂ laseru po dané geometrii CAD modelu, který za sebou zanechává takzvaný „melting pool“, tedy roztavený kov. Jednotlivá zrnka kovového prášku se tak spojí a tuhnou jako jeden kus kovu. Po vytvoření jedné vrstvy modelu je základní deska snížena právě o tloušťku jedné vrstvy a je připravena na nanesení další vrstvy prášku pomocí lišty. Tento celý pracovní proces se opakuje, dokud není výrobek dokončen, (viz. obr. 2.12). Po zchlazení hotového výrobku, je odstraněn přebytečný prášek a provádí se dokončující operace. Celý proces probíhá v inertní atmosféře buď N₂ nebo Ar, čímž se předchází nadměrné oxidaci kovů. [7,9]



Obrázek 2.11 – Složitost tvarů^{36,37}

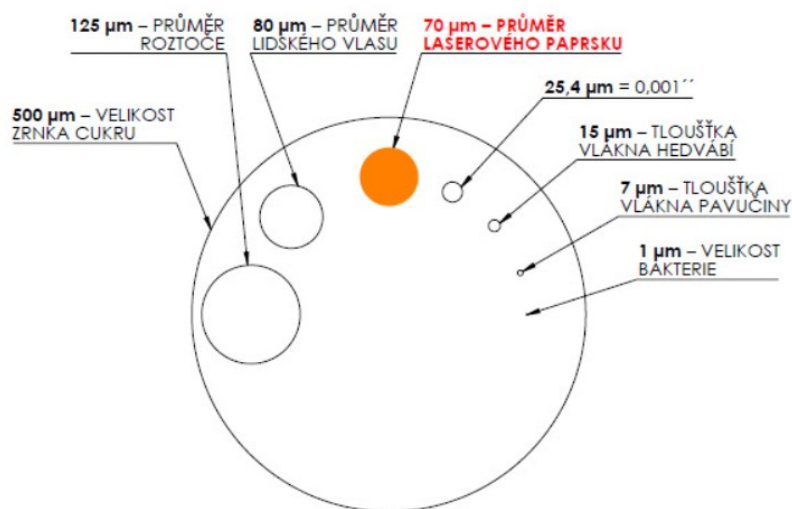


Obrázek 2.12 – Schéma procesu SLM¹⁷

Selektivním laserovým tavením se dokonale roztaví vrstva naneseného prášku, což umožňuje vyrábění součástí s hustotou skoro 100 %. To spolu s jemnozrnnou strukturou, vzniklou díky malým zrnkům prášku, zajišťuje mechanické vlastnosti na úrovni konvenční výroby nebo i lepší.[8]

Laser CO₂

Pro natavení a slinutí prášků se používá vysoce výkonný laser (CO₂), který nataví rovnoměrně nanesený prášek na základní desce. Průměr paprsku má rozměr přibližně 70 mikrometrů (viz. obr. 2.13.). Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 20 až 100 mikrometrů, podle používaného kovového prášku. [17]



Obrázek 2.13 – Porovnání průměru laserového paprsku s jinými subjekty¹⁷

Využití

SLM slouží, jak k výrobě prototypů, tak i finálních produktů. Značné geometrické volnosti produktů SLM se využívá například při výrobě forem nebo nástrojů, protože lze snadno vytvářet chladicí kanálky, což výrazně zvyšuje kvalitu nástrojů. Výrobky se vyskytují i ve zdravotnictví, kde je potřeba pro každého pacienta vytvořit originální tvar pro jeho tělo, například u kyčelních nebo zubních náhrad. [9]

Velký potenciál nachází proces selektivního laserového tavení také při výrobě porézních buněčných struktur, které poskytují velmi dobrou kombinaci relativně vysoké pevnosti a nízké hmotnosti. U výrobků z těchto struktur je navíc možné např. zvětšit tloušťku stěn buněk (případně zvětšit průměry prutů) a docílit tak zvýšení pevnosti součásti pouze v oblastech, ve kterých je nejvíce namáhána. Takové výrobky jsou žádány v automobilovém i leteckém průmyslu. [10]

Dalším využitím SLM může být výroba mechanismů, které se vyrábí jako celek a při dokončovacích operacích se pouze odstraní přebytečný prášek. Způsob je vhodný pro mechanismy, které nevyžadují výrobu a montáž jednotlivých součástí. [10]

Nevýhody

Jednou z nejběžnějších nevýhod SLM je takzvaný „staircase effect“ - nedostatky drsnosti povrchu. Vyskytuje se u všech procesu technologie Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion PBF), kde se produkt vytváří vrstvu po vrstvě. Další nevýhody Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting SLM) jsou:

- energetická náročnost,
- cena zařízení,
- cena materiálu je vyšší než u jiných metod,
- nemožnost tisku uzavřených dutin (materiál zůstane po tisku uzavřen). [7;8]

Nevýhodou může být i ztráta rozměrové přesnosti a kvality drsnosti povrchu v důsledku neefektivního odvodu tepla ze součásti. Pokud je CO₂ laserem natavovaná oblast již na vysoké úrovni nad základní deskou, nedochází k takovému efektivnímu odvodu tepla ze součásti (odvádění tepla může být až stokrát menší). Tím pádem je absorbované teplo větší a oblast roztaveného kovu se rozšíří mimo zamýšlenou část. Výsledný výrobek ztrácí rozměrovou přesnost i kvalitu drsnosti povrchu. [8,3]

Selektivní laserové slinování (Selective Laser Sintering – SLS)

Tato technologie aditivní výroby (AM) byla patentována v 80. letech minulého století Carlem Deckardem, Josefem Beamanem a jejich výzkumným týmem z texaské univerzity v Austinu. Stala se nejstarší technologií aditivní výroby (AM), která se dodnes používá pro tisk 3D modelů. Vzápětí byla také touto skupinou vědců založena společnost DTM se zaměřením na výrobu SLS tiskáren. Fungování firmy vydrželo až do roku 2001, kdy byla zakoupena konkurenční společností 3D Systems.[6]

Princip

Jako stavební materiál jsou u technologie SLS využity látky ve formě prášku (plast, kov, sklo, keramika, guma aj.), u kterých dochází vlivem působení tepla ke změně molekulární struktury. [6]

K natavení a spékání jemných práškových částic je jako zdroj tepla využíván dostatečně výkonný CO₂ laser s usměrněným paprskem. Základní technické principy této metody se velmi podobají principům technologie na bázi fotopolymerů. Na pracovní desku je nanесena vrstva prášku a pomocí laseru je nataveno požadované místo nebo plocha. Po dokončení aktuální vrstvy objektu následně dochází k posunu pracovní plochy směrem dolů o velikost další vrstvy, zatímco nádoba s materiálem je posunuta směrem vzhůru, aby mohla být za pomoci válce nanесena nová vrstva materiálu. [6]

Využití

Využitím této technologie je dosaženo minimalizace množství vzniklého odpadu v porovnání s jinými technologiemi 3D tisku. Zbylý prášek je možné recyklovat a využít pro tisk dalšího 3D modelu. Mezi výhody lze zařadit i širokou škálu použitých materiálů. Technologií SLS je možné během jedné tiskové úlohy vyprodukovat i několik odlišných objektů nebo kompletně funkčních celků, často velmi složitých geometrických tvarů, které se běžnými konvenčními metodami vyrábějí velmi obtížně. Za charakteristické vlastnosti 3D modelů vyrobených touto metodou jsou považovány pevnost, odolnost a dlouhá životnost v závislosti na použitém materiálu. [3,4]

Tavení elektronovým paprskem (Electron Beam-Melting – EBM)

Tento proces používá jako zdroj tepla elektronový paprsek. Tavení elektronovým paprskem je podobné jako u metod SLM a SLS. Stroj podává vrstvu kovového prášku na základní desku. Vrstva je pomocí elektronového paprsku roztavena a spečena dle geometrie 3D modelu. Poté se základní deska spustí o tloušťku předchozí vrstvy a další vrstva kovového prášku je nanášena pomocí lišty. Proces potahování prášku a tavení se opakuje, až je celý 3D model dokončen. [32]

Výhodou tohoto procesu je, že zhotovuje výrobky ze standardních kovů, u kterých dosahuje vysoké hustoty (99%) s dobrými mechanickými vlastnostmi (srovnatelnými s tradičními výrobními technologiemi). Ve srovnání s SLM a SLS způsobuje tavení elektronovým paprskem (EBM) menší tepelné namáhání, a proto vyžaduje méně podpůrné struktury. Nezanedbatelnou výhodou je i rychlost 3D tisku. [27]

V porovnání s konvenční výrobou je proces EBM stále pomalý a nákladný. Nevýhodou je i práce s omezeným množstvím kovů. Výrobky obvykle vyžadují velké množství následného opracování. Kvalita povrchové drsnosti je menší než u laserových metod SLM a SLS. [32]

Multi Jet Fusion (MJF)

Technologie 3D tisku Multi Jet Fusion (MJF) se liší od výše uvedených metod v tom, že používá inkoustového pole k nanášení fixačních a detailních činidel, které potom fúzí a zahřívají prvky na pevnou vrstvu. Pro natavení činidla je použit vysokovýkonný infračervený zdroj energie, proto není zapotřebí žádný laserový nebo elektronový paprsek. Prostředky jsou rozptylovány kolem kontur, aby se zlepšilo rozlišení součástí, čímž se otevře možnost výroby realistických modelů.[4]

Výhody procesu MJF:

- tisk z různých materiálů např. PA11 (tažné, kvalitní díly), PA12 (silné, levné díly), PA12 40% skleněné korálky (tuhé, levné kvalitní díly),
- vysoce kvalitní výtisky s nižšími náklady než SLA,
- vysoká rychlost výroby. [38]

Nevýhody procesu MJF:

- kvalita povrchu (je dobrá, ale drsnější než kvalita SLA),
- obarvení světlými barvami. [38]



Obrázek 2.14 – Proces MJF³⁹

3. Zbytkové vnitřní napětí

Při SLM procesu je kovový prášek lokálně nataven pohybujícím se CO₂ laserem. Důsledkem nerovnoměrného prudkého zahřátí a rychlého ochlazení kovu vzniká tahové napětí v součásti. Natavená tenká vrstva má tendenci kroutit předchozí vrstvy směrem k laseru, protože tavenina při ochlazování zmenšuje svůj objem. Jakmile tahové napětí dosáhne meze kluzu materiálu R_m , vznikne v něm trvalá plastická deformace a tvar vyrobené součásti se pak liší od tvaru CAD modelu. Následné procesy nutné k navrácení geometrie do žádaného tvaru by dramaticky prodražily výrobu, proto je nutno tomuto nežádoucímu jevu předcházet. [3,4]

Jednou z teoretických možností, jak vrátit geometrii do požadovaného tvaru je namodelovat součást s negativním úhlem a spoléhat na to, že vlivem napětí se součást zkrouťte do požadovaného tvaru. U skutečné součásti je to velmi složitě realizovatelné, a tak konečný tvar výrobku zpravidla závisí na ukotvení produktu k základní desce. [3,4]

Další možností je navrácení geometrie modelu za pomoci přidání podpěrných struktur, které současně zajišťují i odvádění tepla z CO₂ laserem natavené oblasti a zabraňují výraznějším deformacím součásti. Podpěrné struktury ovšem představují v konečném důsledku plýtvání, jak už energií na jejich výrobu, tak výrobním časem a časem na jejich následné mechanické odstranění. [3,4,7]

3.1. Dělení napětí

Vnitřní napětí v součásti je nežádoucím jevem, který lze eliminovat, ale nikdy ne zcela odstranit. Zbytková napětí jsou taková napětí, která zůstanou v materiálu po dosažení rovnováhy s okolním prostředím. Mohou být řazeny do kategorií podle vzniku, velikosti nebo metody, kterou jsou měřeny.

Podle velikosti je lze rozdělit:

- makro napětí typ I
- mikro napětí typ II
- mikro napětí typ III. [11]

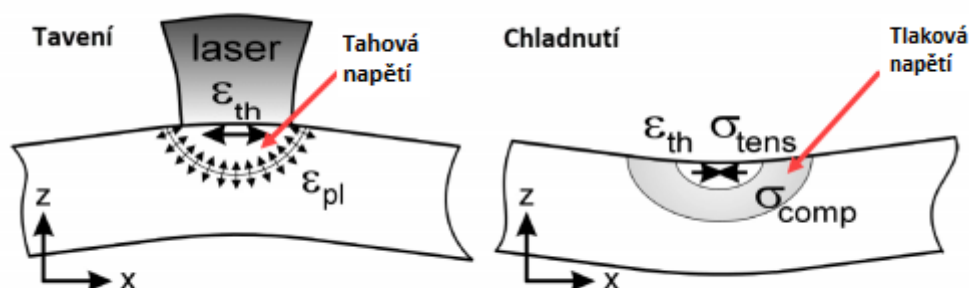
Makro napětí působí na velké vzdálenosti a vznikají z důvodu chyb způsobených např. nerovnoměrnou plastickou deformací při ohýbání součástí nebo vysokými teplotními gradienty např. u svařování. Mikro napětí se objevují na vzdálenostech o velikosti zrn typ II a na vzdálenostech na atomární úrovni typ III. [11]

3.2. Teplotní mechanismy

V technologii SLM dochází vlivem průchodu jednotlivých drah laseru k vysokým teplotním gradientům, které jsou příčinou vzniku teplotních residuálních napětí. Lze rozlišit dva mechanismy jejich vzniku:

- teplotní gradientní mechanismus ohřevu,
- teplotní gradientní mechanismus chladnutí. [11]

Teplotně gradientní mechanismus je důsledkem vysokého teplotního gradientu v místě dopadu laseru. Rychlý ohřev vrchní vrstvy materiálu paprskem laseru a následný pomalejší odvod tepla z tohoto místa, způsobený nízkou tepelnou vodivostí okolního prášku a pevného materiálu, vytvoří strmý teplotní gradient. Materiál v zahřátém místě má snahu o zvětšení svého objemu, ale okolní chladnější materiál ve spodních vrstvách mu v tom brání. Tím v místě dopadu laseru vznikají elastické tlakové deformace a napětí, která mohou dosáhnout až meze kluzu R_m . Po dosažení meze kluzu je vrchní vrstva deformována plasticky. Při chladnutí plasticky stlačené vrchní vrstvy dochází ke smršťování a součást má tendenci se deformovat.[12]



Obrázek 3.1 - Teplotní gradientní mechanismus¹²

Druhý mechanismus vzniku zbytkových napětí je vyvolán chladnutím fází v roztavené vrchní vrstvě součásti. Chladnoucí fáze mají později tendenci se teplotně smršťovat. Této deformaci brání spodní vrstvy v součásti. Tím je vyvoláno tahové napětí ve vrchní vrstvě a tlakové napětí ve spodních vrstvách součásti.[13]

V přípravné fázi tisku lze zmírnit dopad napětí vhodným nastavením podpěrných struktur, strategií tisku a množstvím tištěných součástí v pracovní komoře. Proto se ke zmírnění dopadu používá optimalizační počítačový program, který umí vypočítat podpěry tak, aby došlo k co nejmenšímu napětí. Optimalizační program umožňuje simulovat proces stavby a předvídat chování materiálu, který se zpravidla vlivem tepelného napětí deformuje. Předejít takovému jevu lze optimalizací procesních parametrů, jako jsou přesné definice chemického složení kovového prášku, výkon laserové zařízení, volba strategie a rychlost skenování atd. [13]

3.3. Optimalizační počítačový program

Nezbytnou, ne-li tou nejdůležitější součástí 3D tiskáren, je jejich software. Jeho hlavním úkolem je příprava dat pro řídicí systém stroje umožňující kvalitní tisk dílů. S tím souvisí hned několik funkcí, které jsou u těchto softwarů požadovány a jsou jejich nezbytnou součástí. Jelikož jde o funkce, které přímo ovlivňují samotný proces výroby, je žádoucí, aby použitý software dosahoval co největších kvalit.

Na trhu je hodně možností výrobců těchto optimalizačních počítačových programů. Jednoznačné prvenství v oblasti dodávání těchto softwarů drží již několik let společnost Materialise. V simulování napětí je výběr programů zúžen. Na výpočet a snížení napětí a následné deformace byl vybrán do Diplomové práce optimalizační počítačový program Simufact Additive, který je výkonným softwarovým řešením pro simulaci výrobních procesů aditivní výroby na bázi kovů.

3.4. Měření napětí

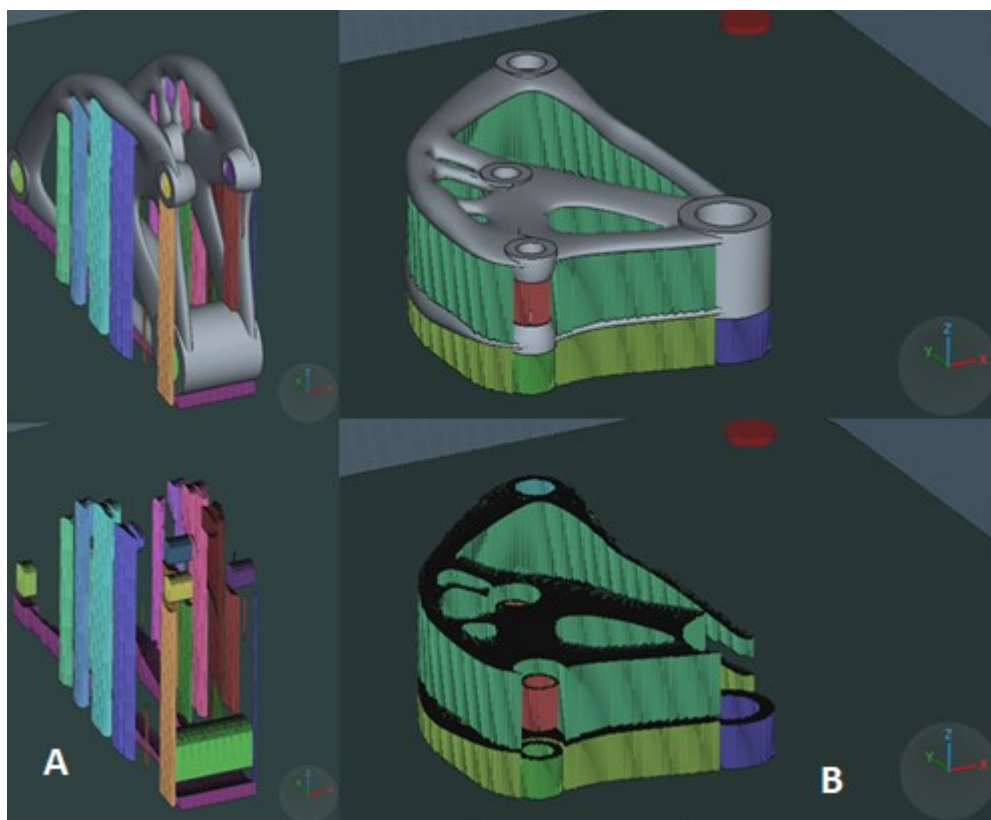
Měření zbytkových napětí lze provádět několika způsoby a to, mechanicky, kde je nejčastěji měřena odchylka přetvoření dílu během vzniku zbytkových napětí nebo odebráním materiálu pro relaxaci napětí. [12]

Zbytková napětí se dají měřit elektronovou, rentgenovou i neutronovou difrakcí. Dalšími metodami pro měření zbytkových napětí jsou magnetické, elektrické, ultrazvukové metody a metody pracující na principu piezoelektrického efektu. [12]

3.5. Orientace součásti

Orientace součásti má významný vliv na výrobní čas, kvalitu povrchu, nutnost použití podpůrných struktur, množství prášku nezbytného pro tisk a smršťování součásti. Musí být provedena především s ohledem na funkci součásti. Touto problematikou, orientace součásti, se zabývá celá řada studií. Výzkum poukazuje na důležitost přesnosti STL modelu, jeho rozřezání do vrstev formátu CLI. Technologie aditivní výroby pracuje s celou řadou faktorů, jako doba stavby, náklady na výrobu, problematické rysy součásti (díry, osy, kritické plochy atd.), převislé konce, objem podpor atd. K jednotlivým kritériím se přidělí bodové ohodnocení, na jehož základě je vybrána nejvhodnější orientace v pracovní komoře. [14]

Orientací tisku se dá významně ovlivnit kvalita povrchu součásti, resp. jeho drsnost a rozměrová přesnost. Velmi často je však orientace součásti nastavována nikoliv s prioritou na kvalitu povrchu, ale jako kombinace kvalitativních a ekonomických požadavků zákazníka, například v cenové kalkulaci a množství podpěr. Porovnáním variant orientace je model A razantně levnější, protože je podepřen menším množstvím podpěr (viz obr 3.2). [15,16]



Obrázek 3.2 – Vhodná orientace modelu

3.6. Podpůrné struktury

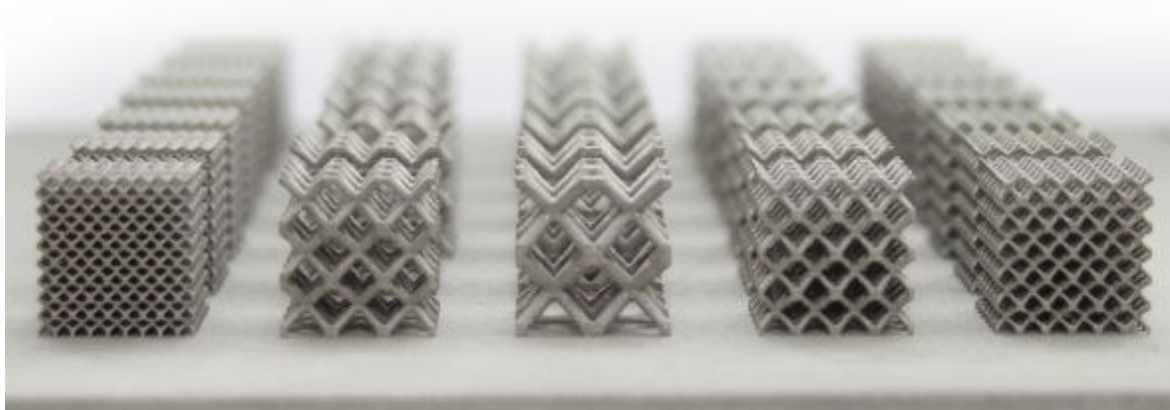
Vzhledem k tomu, že je při 3D tisku výrobek vytvářen postupným nanášením, musí v mnoha případech 3D tiskárna vytvářet podpěry, jejichž úkolem je stabilizovat a podepřít převislé části vznikajícího objektu. U technologií 3D tisku platí pravidlo, že převislá místa lze tisknout bez použití podpěr, pokud jejich úhel nepřesahuje 45° od svislice (viz. obr 3.4). V závislosti na použití technologie, aditivní výroby SLM, jsou podpěry voleny ze stejného materiálu jako samotný výrobek. [24]

Návrh podpěr je závislý především na funkci a orientaci součásti a na zkušenosti operátora. Obecně je dáno několik pravidel určujících, kdy je nutné použít podpěry, a kdy lze tisknout bez podpěr. S tím je spjatý i samotný návrh součásti, který by měl tato pravidla akceptovat, a tím omezit nutnost stavby podpěrných struktur, zkrátit čas tisku a čas dokončovací operace tzv. post – processing. [23]

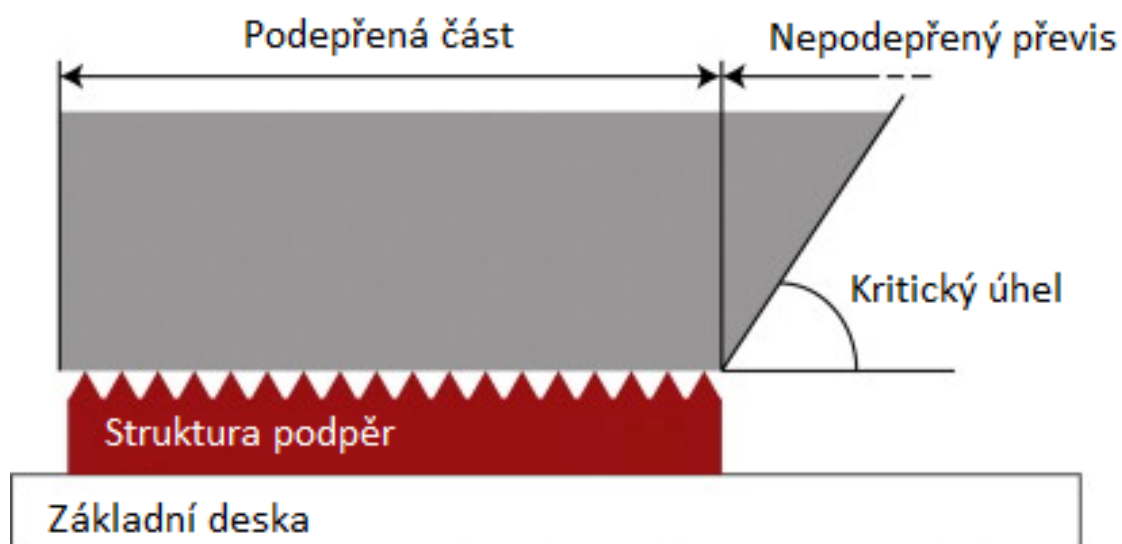
Podle pravidel musí podpěry:

- zajistit součást proti oddělení od stavební platformy v průběhu procesu výroby,
- umožnit odvod tepla ze součásti,
- podpírat převislé konce,
- být snadno odstranitelné.

Existuje celá řada typů podpěrných struktur. Jejich použití a parametry nastavení jsou závislé na funkci, velikosti a materiálu součásti. (viz. obr. 3.3)



Obrázek 3.3 - Řada typů podpěrných struktur¹⁹



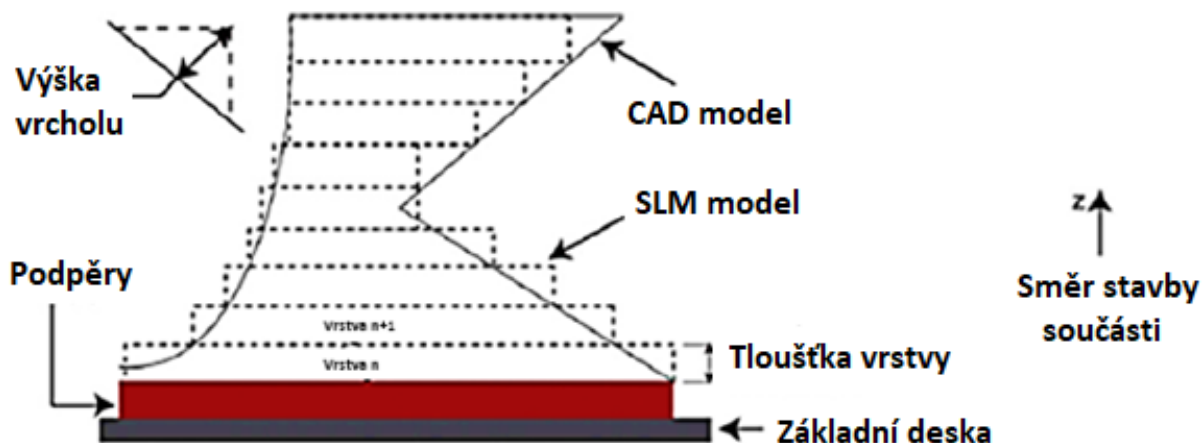
Obrázek 3.4 – Vizualizace převisu⁴⁰

3.7. Tloušťka vrstvy

Pro každý tištěný materiál jsou nastaveny tloušťky vrstvy v přednastavených parametrech. Variabilita tohoto parametru je omezena výrobcem v závislosti na mnoha vlastnostech materiálu. Jedním z nejdůležitějších aspektů jsou mechanické vlastnosti, které by měly být shodné s vlastnostmi obrobků vyrobených na konvenčních strojích. [23]

Tloušťka vrstvy ovlivňuje výrobní čas, kvalitu povrchu, a s tím související schodišťový efekt, smrštění součásti a rozměrovou přesnost. Z principu aditivní výroby, která vychází ze spékání jednotlivých vrstev, není možno zajistit dokonale souvislou tvarovou plochu. To se výrazně projevuje např. u válcových těles s vodorovnou osou tzv. schodišťovým efektem, který lze eliminovat snížením tloušťky vrstvy, ale nelze jej zcela odstranit. [23,33]

Schodišťový efekt je závislý na směru stoupání či klesání problematické plochy. V důsledku toho dochází ke změně tvaru a rozměru součásti ve vztahu k jmenovitému rozměru. (viz. obr. 3.5). [33]



Obrázek 3.5 - Schodišťový efekt při stavění ²³

3.8. Kalibrace v programu Simufact Additive

Jde o mechanické měření makro analýzy v měřítku. Výsledkem kalibrace jsou vlastní (inherentní) hodnoty napětí a následné deformace materiálu. Simufact Additive vyžaduje zadání tzv. vlastních hodnot napětí před simulací. Tyto vlastní hodnoty napětí závisí na vlastnostech materiálu a procesních parametrech. Kalibrace parametrů vnitřního napětí materiálu je provedena experimentálně pomocí programu Simufact Additive 4.0. Těchto parametrů lze využít pouze pro stejnou strategii na stejném stroji. [18]

Kalibrace vnitřního napětí může být provedena dvěma metodami. První metoda je zaměřena na zjištění průměrného vnitřního napětí, druhá metoda na elementární vnitřní napětí. Každá varianta má podmínky realizace. [18]

Při kalibraci průměrného vnitřního napětí nelze ze stanovených podmínek využít zjištěných hodnot pro jiný model. Touto metodou je možno pouze jednou vytisknout kalibrační konzolové rameno, a to mřížkovou strategii. Při výběru správné izometrie lze využít posunutí v ose Z. Pro ověření kalibrace, lze vytisknout více konzol se stejnou mřížovou strategií (viz. obr. 3.5). [18]

U druhé metody, tj. zjišťování elementárního vnitřního napětí, jsou stanoveny podmínky, které umožňují napětí použít i pro skutečnou část, která je vytištěna s odlišným přírůstkovým úhlem. Úhel může být měněn pro jinak tvarově odlišné modely. V této metodě se doporučuje ortogonální souřadný systém, aby se dosáhlo optimálních výsledků. Dále se doporučuje pro přesnější kalibraci, aby kalibrované vzorky byly vytištěny jednou strategií, a to skenováním bez přírůstkové rotace. V úvahu přichází i distribuované napětí z knihovny programu. [18]

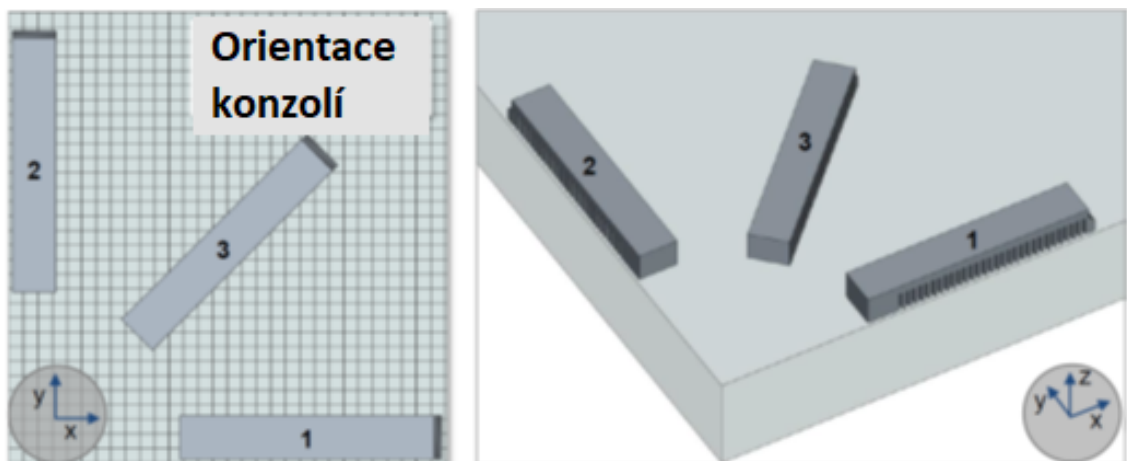
3.8.1. Postup kalibrace

Metoda 1: Průměrné vnitřní napětí.

Metoda se používá k určení průměrných vnitřních napětí., které pocházejí ze sestavení zkušebního vzorku s prostorově proměnné šrafovací strategie, jako je šachovnice.

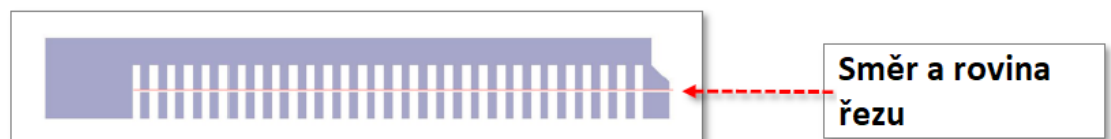
Postup kalibrace:

- pro kalibraci se musí vytisknout alespoň jedna konzole, která bude orientována v ose X nebo Y, [18]
- pro kontrolu kalibrace je vhodné vytisknout další dvě konzoly, které se otočí o 45° proti první, a to v rovině X a Y (viz. obr. 3.6), [18]



Obrázek 3.6 – Orientace tisku kalibračních konzolí v metodě 1¹⁸.

- kalibrační konzoly se řezou převážně uprostřed zubů tak, aby určitá část z nich zůstávala na základní desce (viz. obr. 3.7), dosáhneme jednodušší post – processing, [18]



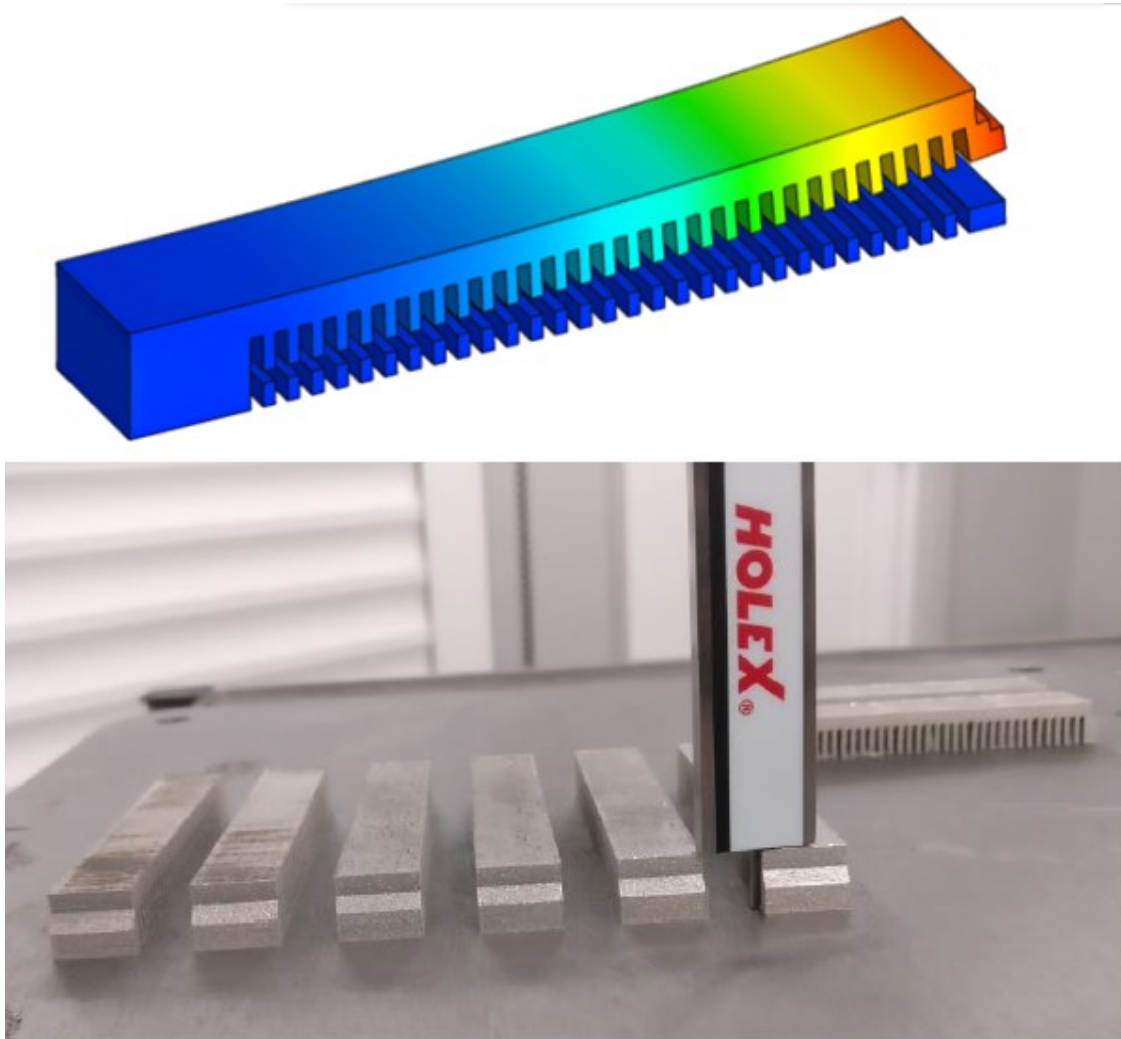
Obrázek 3.7 – Řez kalibračních konzolí.¹⁸

- změření maximálního zakřivení v ose Z se hodnotí po oříznutí u každé tištěné konzoly. (viz. obr. 3.9) Určí se maximální výška v ose Z a odečte se od původní výšky (viz. obr.3.8), [18]



Obrázek 3.8 – Měření zakřivení v ose Z¹⁸

- po změření maximálního zakřivení v ose Z (viz obr. 3.9) se zadají hodnoty zakřivení do systému Simufact Additive pro automatickou kalibraci. Následně systém vygeneruje kalibrační formulář.

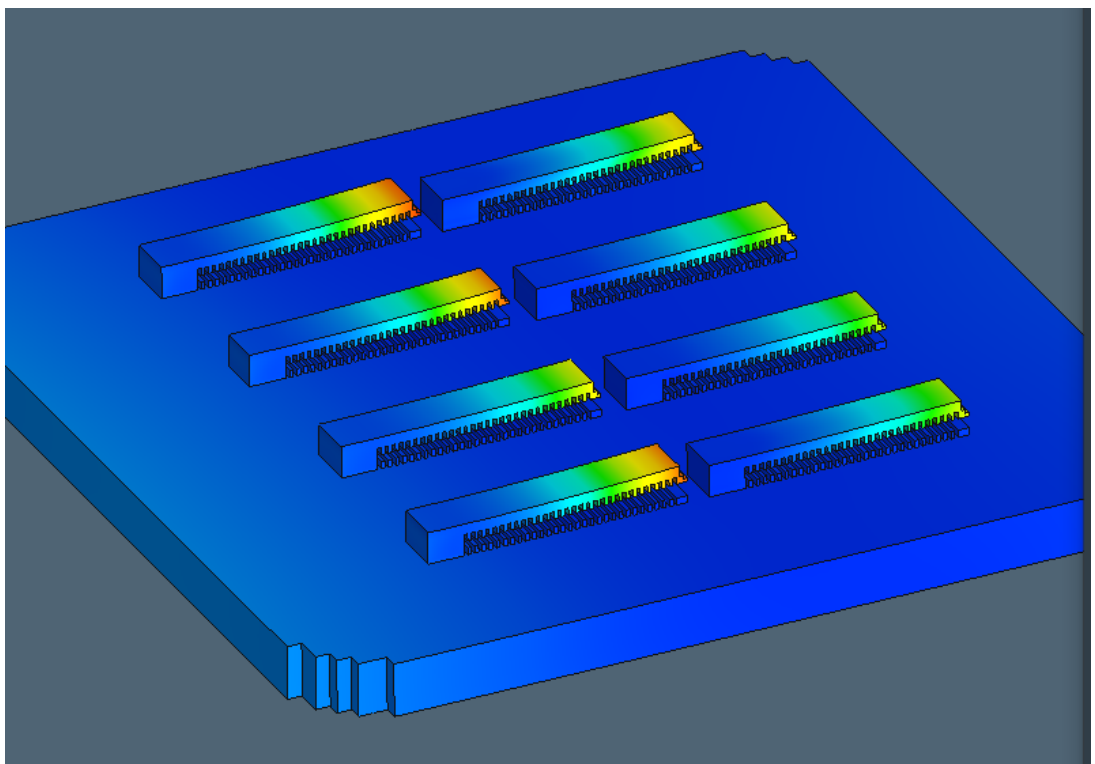


Obrázek 3.9 – Měření a simulované odřezání kalibrační konzoli¹⁸

Metoda 2: Elementární univerzální napětí

Pomocí této metody je určeno vnitřní napětí, které se může následně používat i na 3D modely s jinou mřížkovou strategií. Tato metoda je přesnější v kalibraci kvůli přesnějšímu systémovému skenování. Při použití obousměrného skenování se vykazují lepší výsledky než u univerzálního skenování. Postup kalibrace:

- pro kalibraci se vytisknou alespoň 3 konzoly. První dvě jsou vytištěny ve směru osy X, třetí konzola rovněž ve směru osy X, ale s posunutím ve směru osy Y (viz. obr. 3.10),



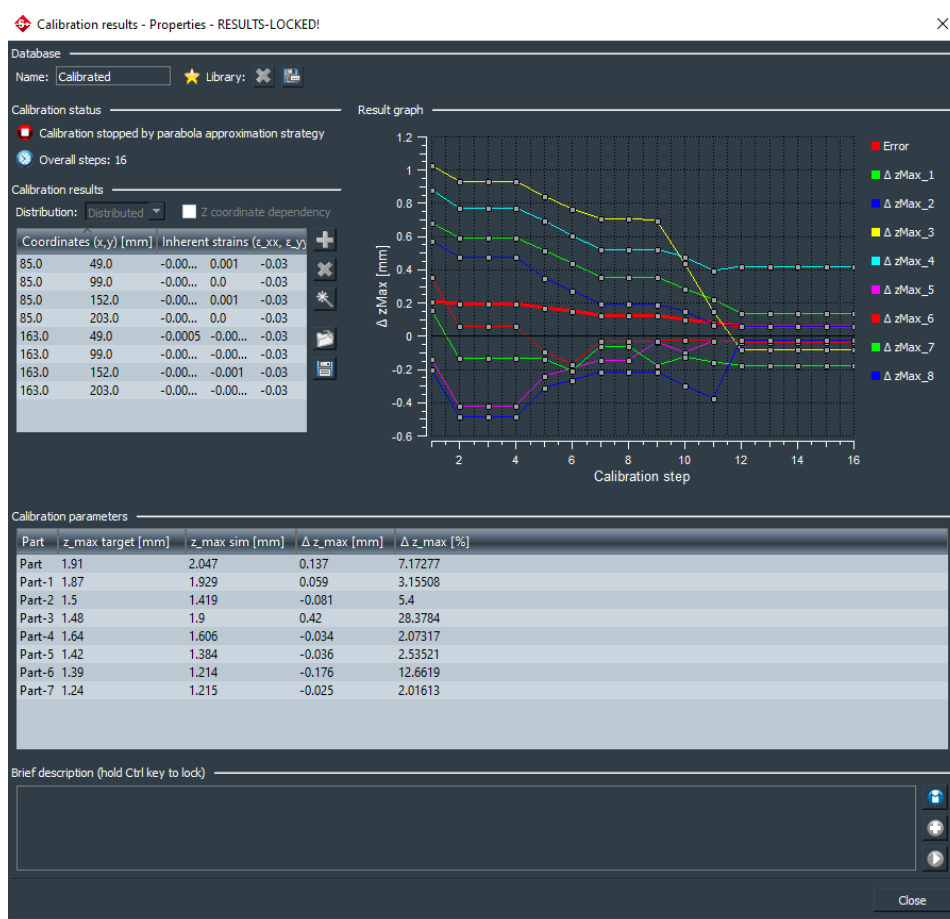
Obrázek 3.10 – Orientace metody 2 při kalibraci¹⁸

- po tisku kalibračních konzol se používá strategie skenování v globálním systému pro konzoly 1 až 3,
- následně se nahraje změřený sken do programu, který po zadání parametrů vyexportuje kalibrační formulář.

3.8.2. Kalibrační formulář

Po simulaci v programu je vytvořen kalibrační formulář (viz. obr. 3.11). V první části formuláře jsou koordináty kalibračních konzol a vedle nich je uvedeno vnitřní napětí materiálu 316L, jako nejdůležitější část formuláře. V další části se nachází maximální a výchozí zakřivení v ose Z. Zakřivení je uvedeno v i procentuálních hodnotách.

Poslední část je tvořena grafem, který přehledně znázorňuje jednotlivé velikosti zakřivení při každém kroku tisku. Výsledkem je vyexportování kalibračního souboru, který je uvedený ve formátu XML.



Obrázek 3.11 – Kalibrační formulář materiálu 316L

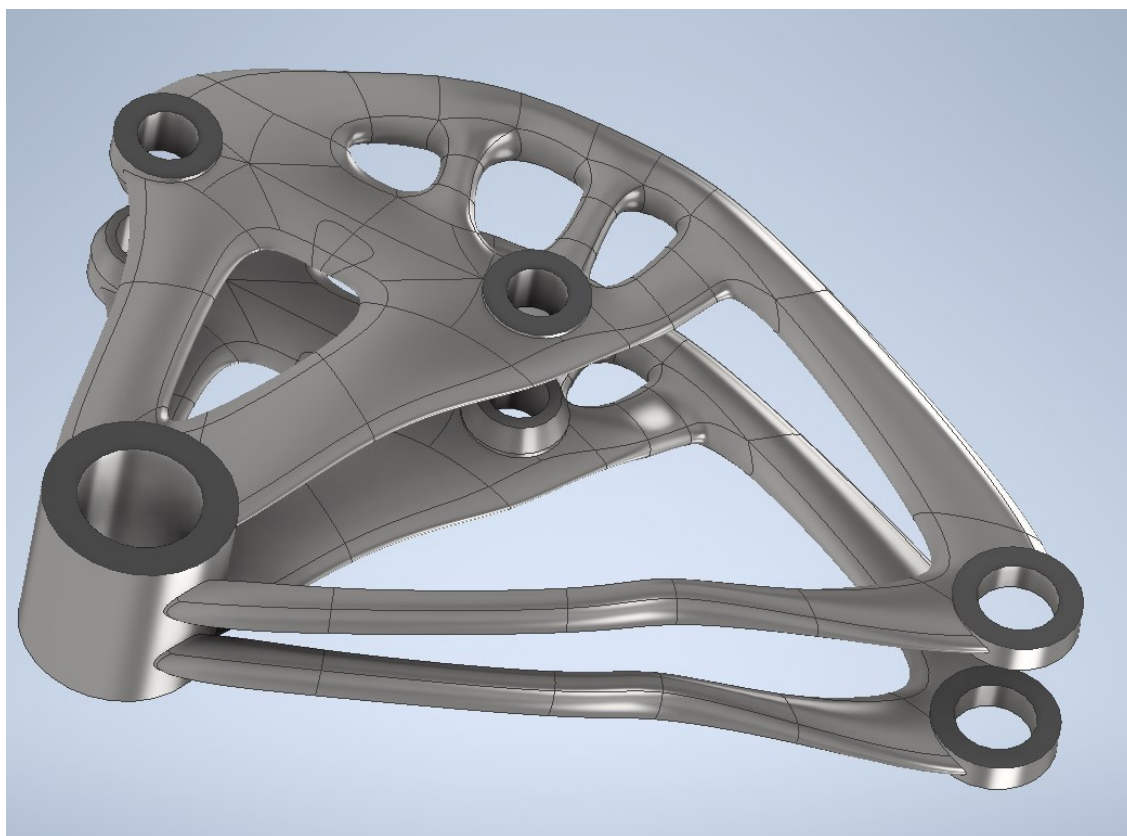
3.9. Programování a simulace Simufact Additive

3.9.1. Topologická optimalizace

Topologická optimalizace ve spojení s technologií aditivní výroby představuje významnou úsporu materiálu, která s sebou přináší pozitivní přínos nejen v automobilovém, ale i leteckém průmyslu. Topologická optimalizace využívá nejmodernější výpočetní metody, a tak současně přináší optimalizovaný tvar součásti, který je lehčí, a současně jsou zachovány jeho pevnostní předpoklady. [19]

3.9.2. Zadaný model

Zadaný 3D model, vahadla studentské formule (viz. obr.3.12), má vypočítané přídavky na obrábění a prošel topologickou optimalizací, která snižuje objem použitého materiálu při zachování tuhosti. Model byl vyexportován do formátu STL, aby program na 3D tisk kovu mohl 3D model rozložit do vrstev.



Obrázek 3.12. – Vahadlo studentské formule

3.9.3. Vstupní materiál

Vstupním materiálem je prášek (viz. obr. 3.13) z nerezové oceli AISI 316L, který je připraven pomocí práškové metalurgie. Konkrétně atomizací, při které v důsledku působení plynu, byla tavenina rozstříkována do malých kapiček. Kapičky v krátkém čase tuhnou do jemných kulovitých tvarů. Průměr práškových částic dosahuje $45 \pm 15 \mu\text{m}$. Chemické složení materiálu je uvedeno v tabulce 3.1 a mechanické vlastnosti materiálu v tabulce 3.2. [13]

ocel	Cr(%)	Ni (%)	Mo (%)	Mn (%)	Si(%)	N(%)	O(%)	P (%)	C(%)	S(%)
316L	16-18	10-14	2-3	2 max	1 max	0,1 max	0,1 max	0,045 max	0,03 max.	0,03 max

Tabulka 3.1- Chemické vlastnosti materiálu²⁰

AISI	DIN	Rp 0,002 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
316L	1,4404	>240	>675	>43

Tabulka 3.2 – Mechanické vlastnosti materiálu¹³

Oceli s označením AISI 316L se řadí k austenitickým ocelím s vysokou odolností proti korozi. Další příbuzné oceli 316L jsou 316 a 316Ti. Oceli se liší v nepatrném chemickém složení materiálu. [13]

Výhodou materiálu 316L je zachování vysoké odolnosti proti mezikrystalové korozi po svařování. Materiál AISI 316L se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi při lisování, ohýbání a tažení. Tato nerezová ocel se často používá v chemickém průmyslu, v zařízeních pro styk s mořskou vodou a pro výrobu bazénových doplňků. [20]



Obrázek 3.13 -Prášek nerezové oceli 316L⁴¹

3.9.4. Použitá tiskárna

Renishaw AM400

Tiskárna od firmy Renishaw AM 400 (viz. obr. 3.14) pro aditivní výrobu z kovu byla nahrazena novějším systémem RenAM 500E, který nabízí všechny přednosti platformy AM 400.

Renishaw AM 400 je vybaven nejnovějšími aktualizacemi systému včetně většího filtru SafeChange™, zdokonaleného řídicího systému optiky, přepracovaným prouděním plynu, systémem ochrany okna a novým 400 W optickým systémem, který poskytuje paprsek s průměrem zmenšeným na 70 μm . Objem pracovního prostoru je 250 x 250 x 300 mm. Existující 200 W materiálové soubory pro systém AM250 jsou přímo přenositelné na AM 400. Systém AM 400 má vlastnosti stávajícího systému AM250 jako jsou otevřené materiálové parametry, malý půdorys, nejčistější inertní atmosféra a nízká spotřeba plynu, které standardně doplňují přednosti aktualizované aplikace PlusPac.[21]

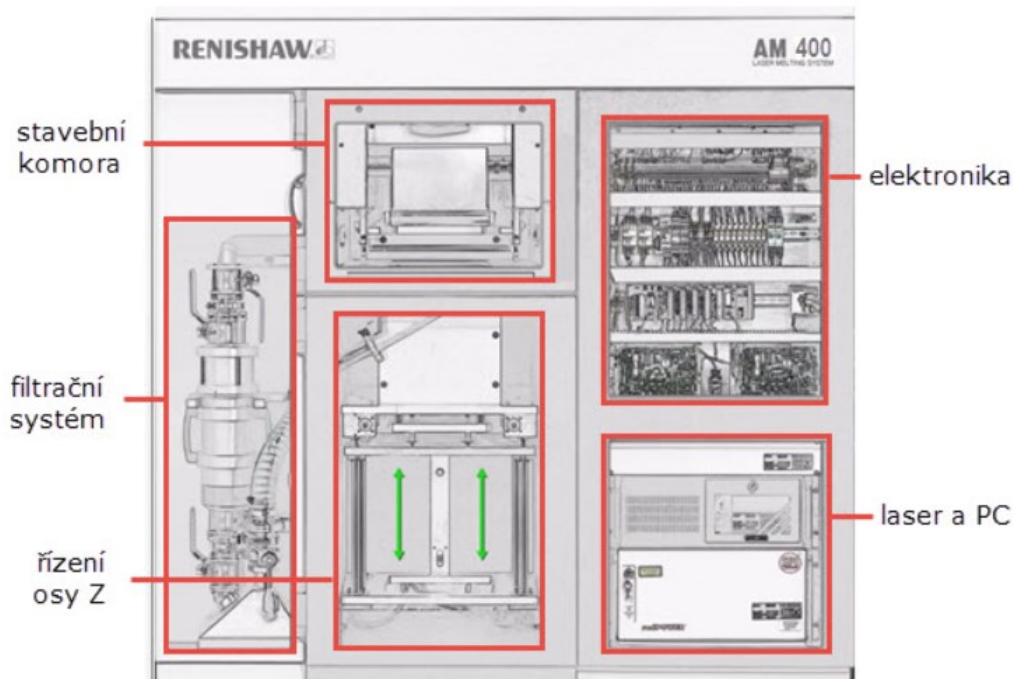
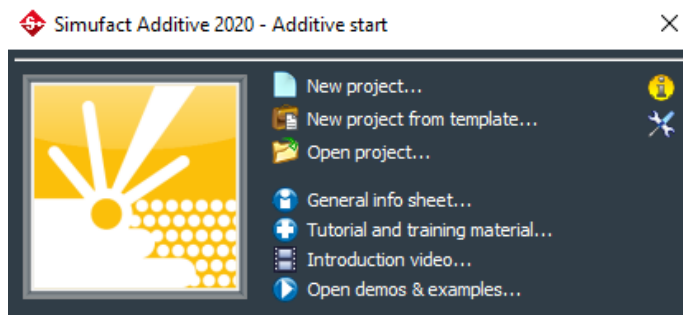


Schéma zařízení Renishaw AM 400

Obrázek 3.14 - Renishaw AM400¹⁹

3.9.5. Popis simulace programu

1. **Vytvoření a pojmenování nového projektu** – Predikace napětí 3D tisku kovových slitin (viz. obr. 3.15).

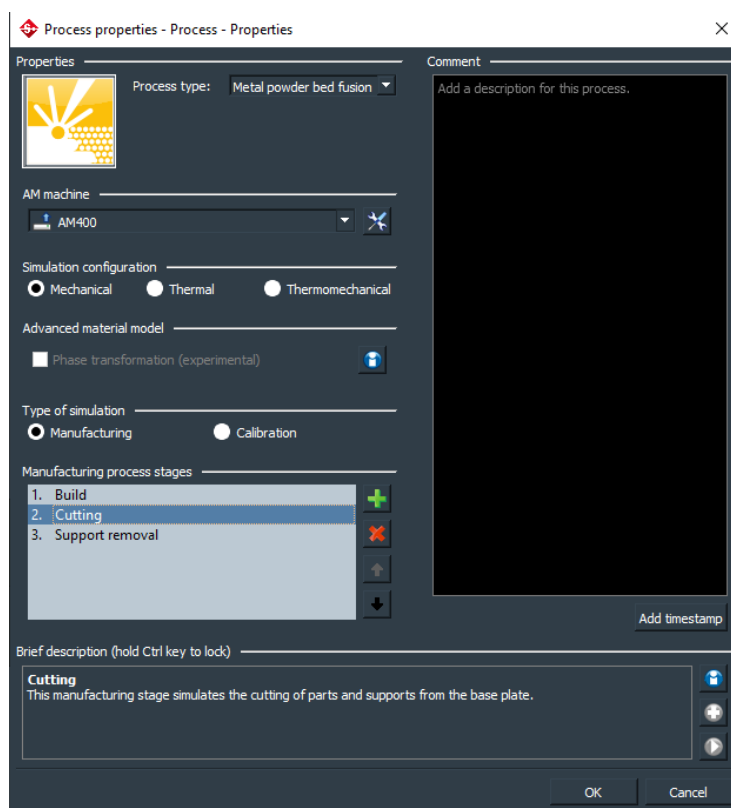


Obrázek 3.15 – Nový program

2. Definice projektu

Projekt obsahuje následující kroky pro nastavení parametrů:

- výrobce a model 3D tiskárny,
- simulační konfigurace,
- typ simulace,
- výrobní procesní dílčí části (viz. obr. 3.16).



Obrázek 3.17 - Definice projektu

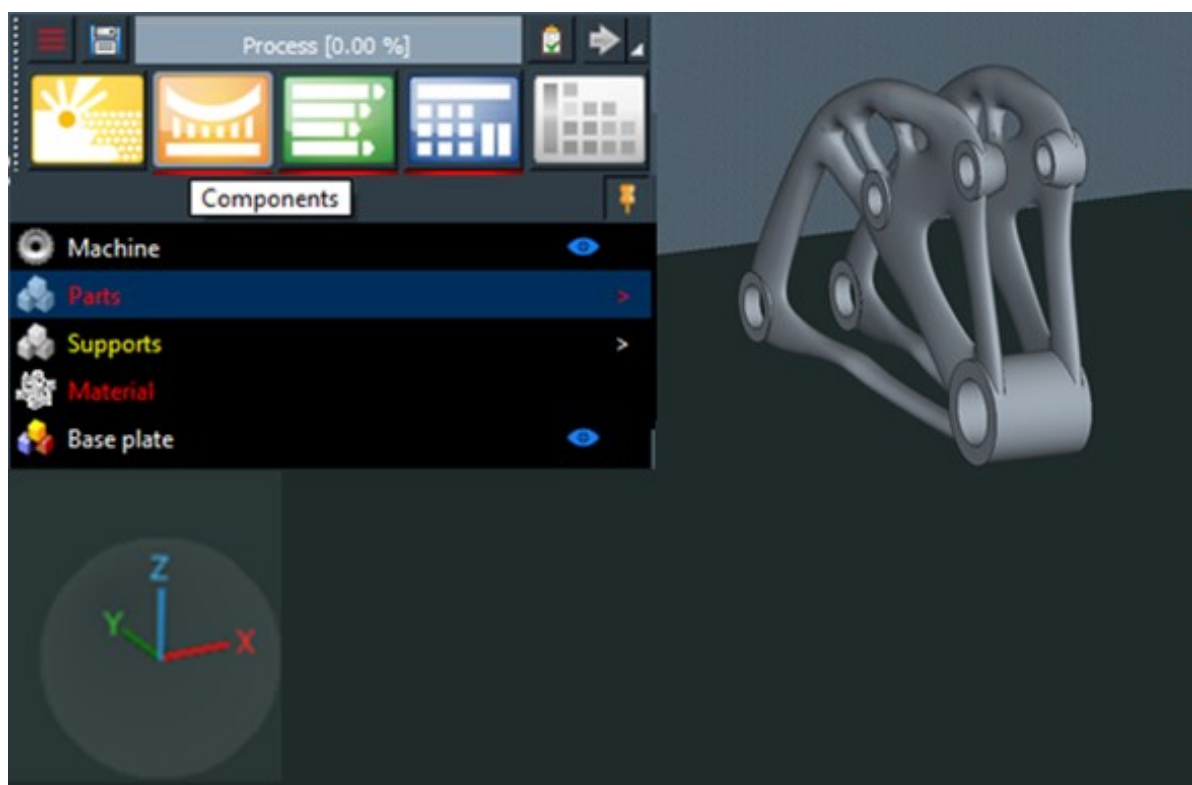
3. Vložení 3D modelu a orientace modelu

Vložení zvoleného 3D modelu z CAD systému je krok, kde se určí výsledná orientace při 3D tisku. (viz obr. 3.18).

Orientace modelu se provádí s ohledem na tvorbu podpěr a stanovení výchozí výšky stavby od horní plochy základní desky.

Model se umísťuje vertikálně vzhledem k vygenerování podpěr s nejmenším počtem využitého materiálu.

Stisknutím levého tlačítka myši lze různě 3D modelem otáčet. Ikona „pozicování“ umožňuje spolehlivě určovat optimální polohu modelu, která potlačí nebo eliminuje 3D tisk podpěr.

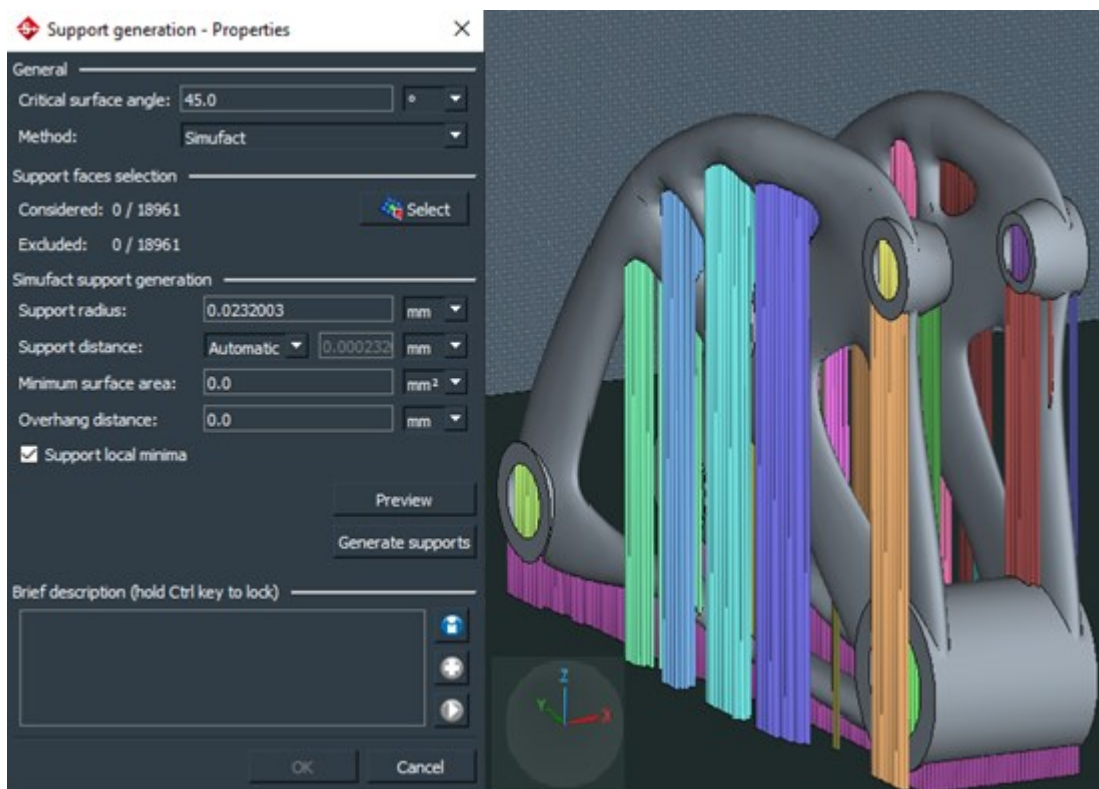


Obrázek 3.18. - Vložení 3D modelu

4. Automatické vygenerování podpěr

V kroku generování podpěr je, jak již bylo řečeno, důležitá orientace modelu. Podpěry se předdefinují pomocí parametrů a program je samovolně vygeneruje. Po vygenerování je možnost některé podpěry odstranit či přidat (viz. obr. 3.19). Při tomto kroku je nutno počítat s určitými podmínkami:

- zajistit součást proti oddělení od základní desky v průběhu procesu výroby,
- umožnit odvod tepla ze součásti,
- podpírat převislé konce,
- zajistit snadnou odstranitelnost.



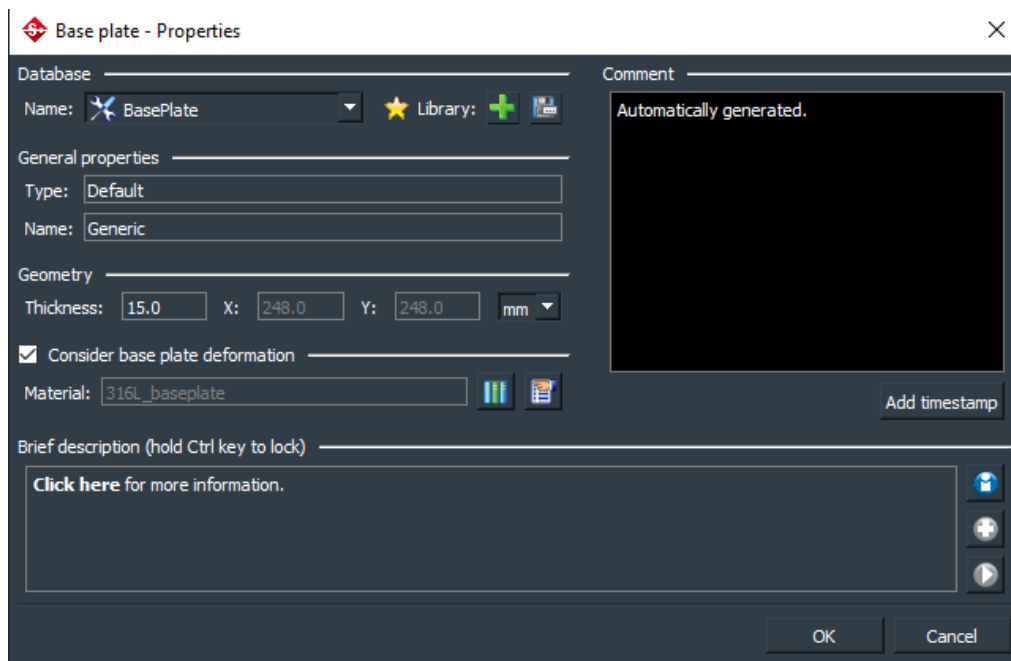
Obrázek 3.19 - Generování podpěr

5. Volba materiálu

Navolit vhodný materiál je velmi důležité, kvůli mechanickým a chemickým vlastnostem. Program nabízí v knihovně rozsáhlý výběr materiálů.

6. Základní deska

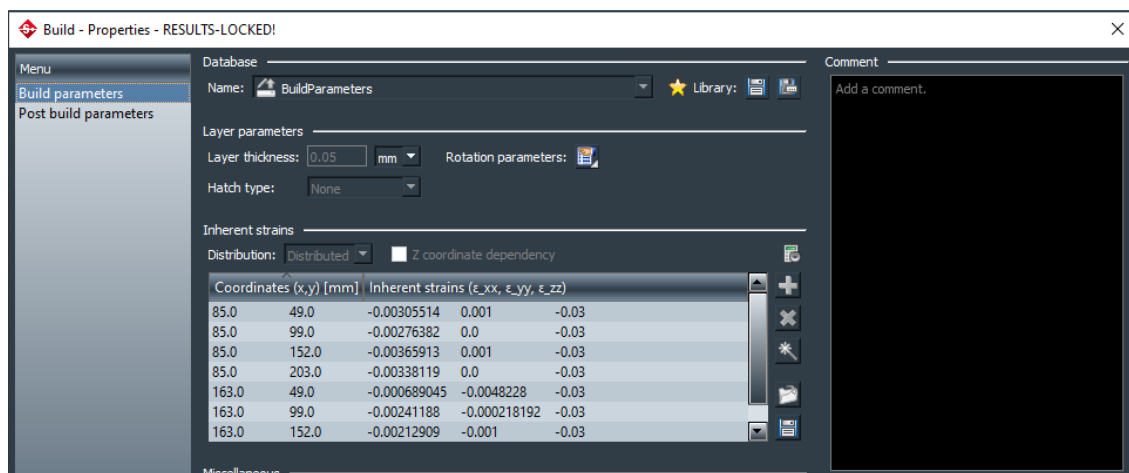
Základní deska je prvkem každé 3D tiskárny. Do programu se musí určit parametrem jako je tloušťka a druh materiálu základní desky. (viz. obr. 3.20).



Obrázek 3.20 - Základní deska

7. Stavění a vložení kalibrace

V této části programu jsou uvedeny stavěcí parametry na základě kalibrace, které mají vliv na velikost vnitřního napětí a deformace (viz. obr. 3.21).



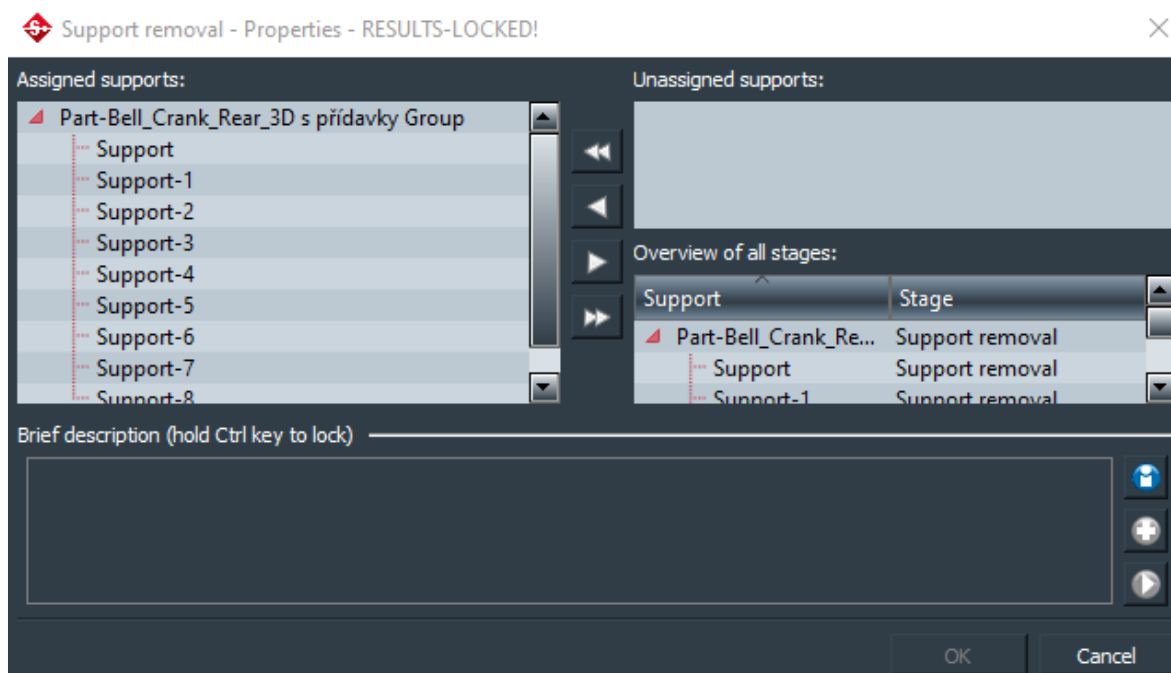
Obrázek 3.22 - Vložení kalibrace

8. Odstranění 3D modelu od základní desky

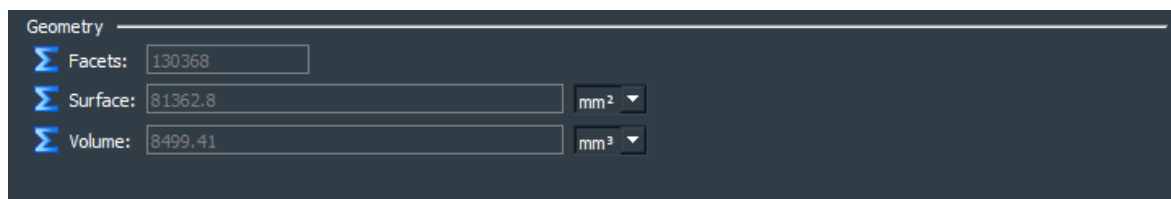
Odstranění 3D modelu od základní desky se provádí 1 až 5 mm od základní desky dle výšky stavěcí podpěry. Odřezání se realizuje pásovou pilou nebo elektroerozivním řezáním drátem. Pro následující použití se musí základní deska opracovat frézováním a broušením.

9. Odstranění podpěr od modelu

Vybrané podpěry jsou odstraněny (viz. obr. 3.23) a následně je zjištěn objem použitých podpěr (viz. obr. 3.24). Odstranění podpěr zapadá do dokončovacích operací (post processing). Podpěry se v praxi odstraňují mechanicky. Proces je finančně i časově náročný.



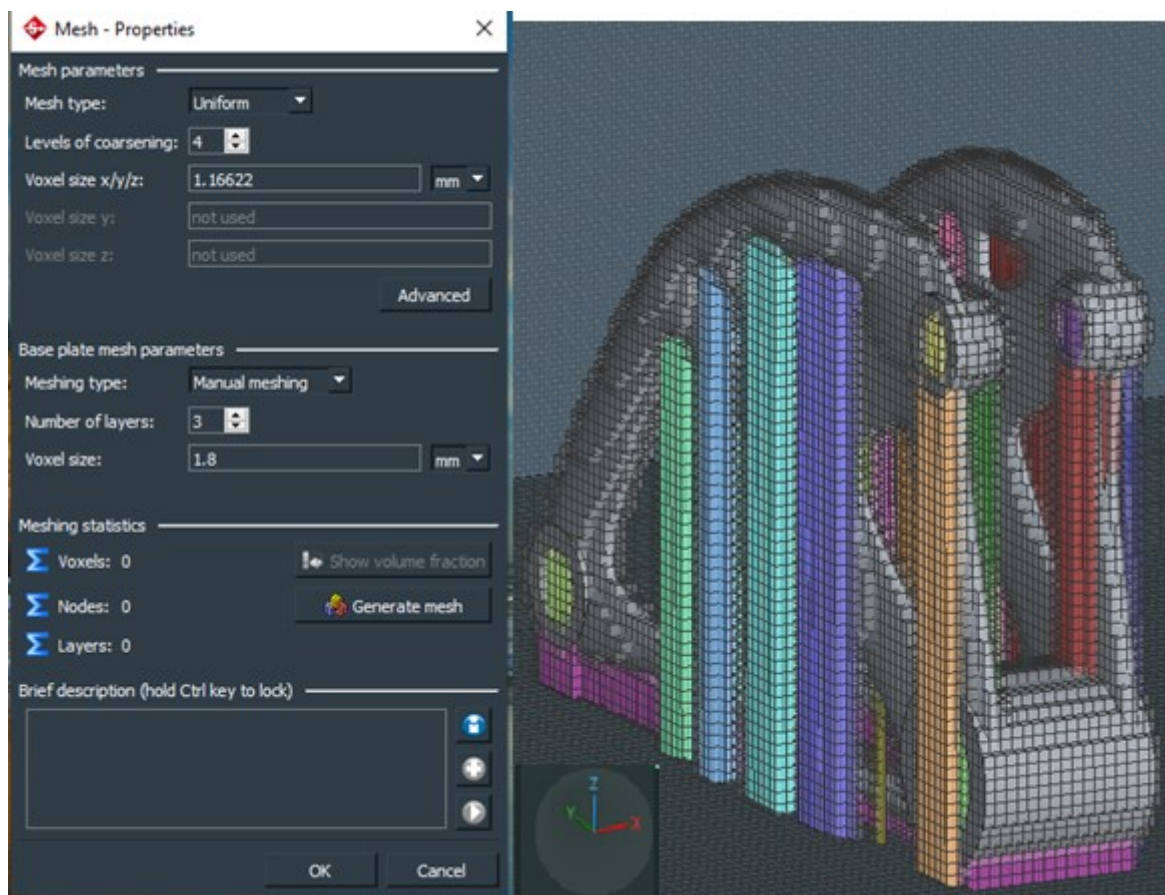
Obrázek 3.23 – Volba odstranění podpěr



Obrázek 3.24 – Objem použitých podpěr

10. Voxel mesh (voxel síť)

Voxel (jednotka prostoru, odpovídající třídimenzionálnímu pixelu) síť přetransformuje a rozdělí 3D model s podpěrami na malé části, které odpovídají velikosti zrn použitého materiálu (viz. obr. 3.25). Hodnoty velikosti zrn v osách X, Y, Z je nutno nastavit. [24]



Obrázek 3.25 - Voxel mesh

11. Numerické parametry

Před spuštěním simulace je zapotřebí vypnout tzv. „parallelization“.

12. Spuštění simulace

Nejdříve jsou zkontrolovány všechny zadané parametry. V hlavním menu, v pravém horním rohu, je zelenou šipkou spuštěna simulace.

13. Výsledný model simulace

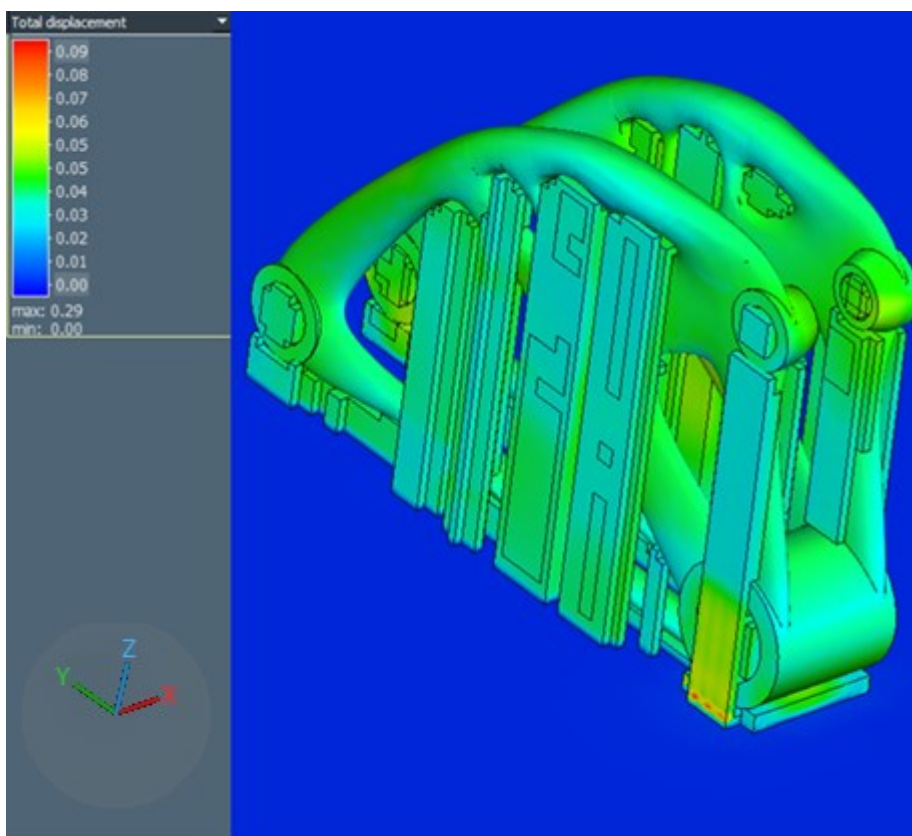
Po vypočítání simulace se znázorní následující procesy:

- modelování a tisk modelu,
- odstranění 3D modelu od základní desky,
- odstranění podpor,
- výsledný model s vypočítanými deformacemi.

Vypočítané deformace lze přepočítat do modelu s předdefinovanou geometrií. Po simulaci programu se model téměř ztotožní s rozměry na výkresové dokumentaci.

14. Modelování a tisk modelu

První fáze simulace je modelování, ve které je znázorněn model s podporami na základní desce. Zde lze vidět deformace v mm, které jsou zaviněny velkým přísunem tepla od laseru tiskárny a následujícím ochlazením (viz. obr.3.26).

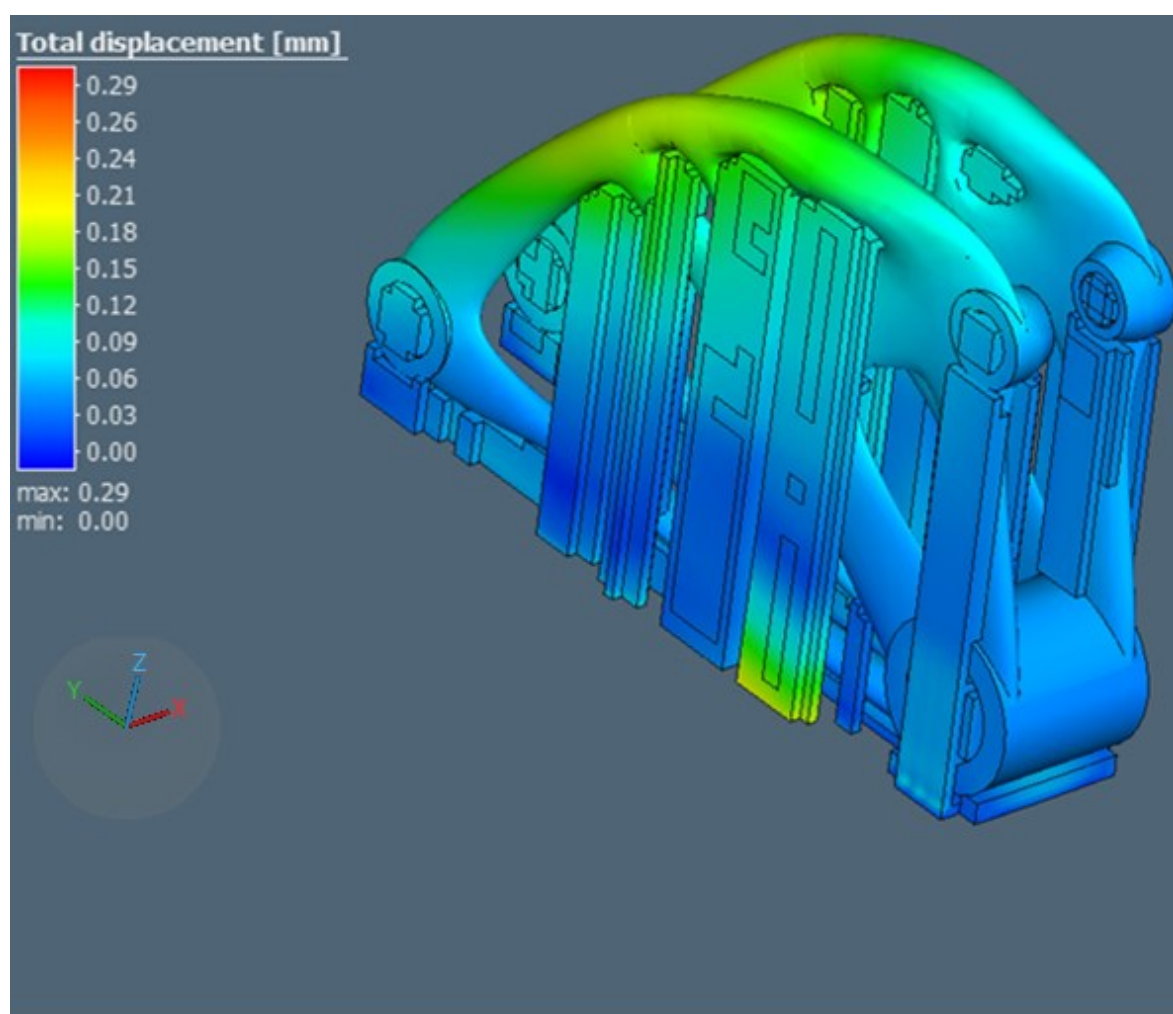


Obrázek 3.26 – Tisk modelu v simulaci

15. Odřezání 3D modelu od základního desky

Odřezání modelu s podporami od základní desky se provádí většinou pásovou pilou nebo nekonvenčním obráběním – elektroerozivním obráběním drátem (EDM). Na níže uvedeném obrázku (obr. 3.27.) je vidět odřezání modelu ve výšce 3 mm. Vnesené napětí a teplo od řezání se projeví v celkové hodnotě deformace.

Základní deska (pozůstatek stavby a podpor) je v praxi obráběná frézováním a povrch se dokončí broušením naplocho, aby základní deska byl připraven na další použití.

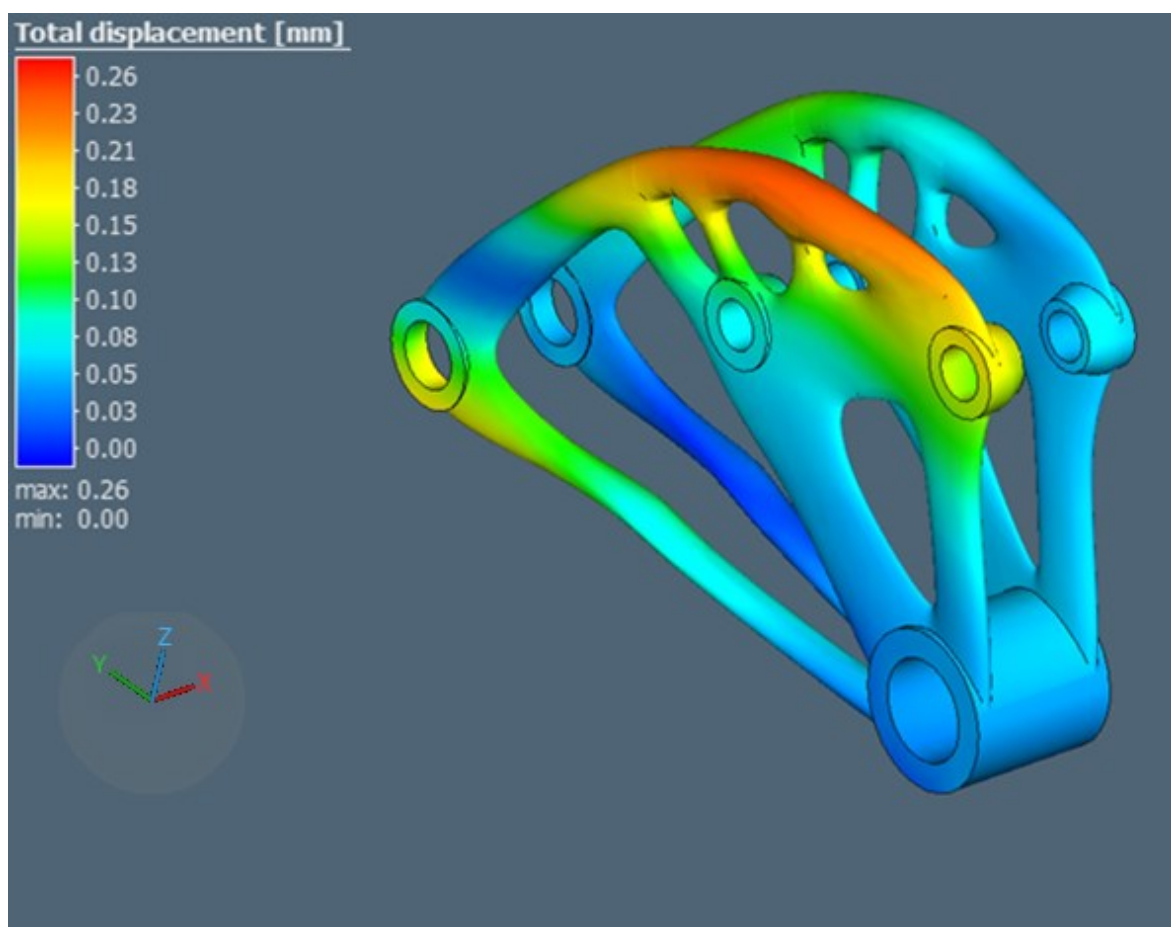


Obrázek 3.27 – Odřezání modelu od základní desky

16. Odstranění podpěr

V další fázi dochází k odstranění pomocných podpěr a zbylého prášku z případných vnitřních dutin (slepých děr drážek atd.) (viz. obr. 3.28). Nízké teploty používané v procesu zajistí, že model vykazuje menší deformace. Výsledkem je surový model z tiskárny, který je dále opracováván, operace se jmenují post-processing.

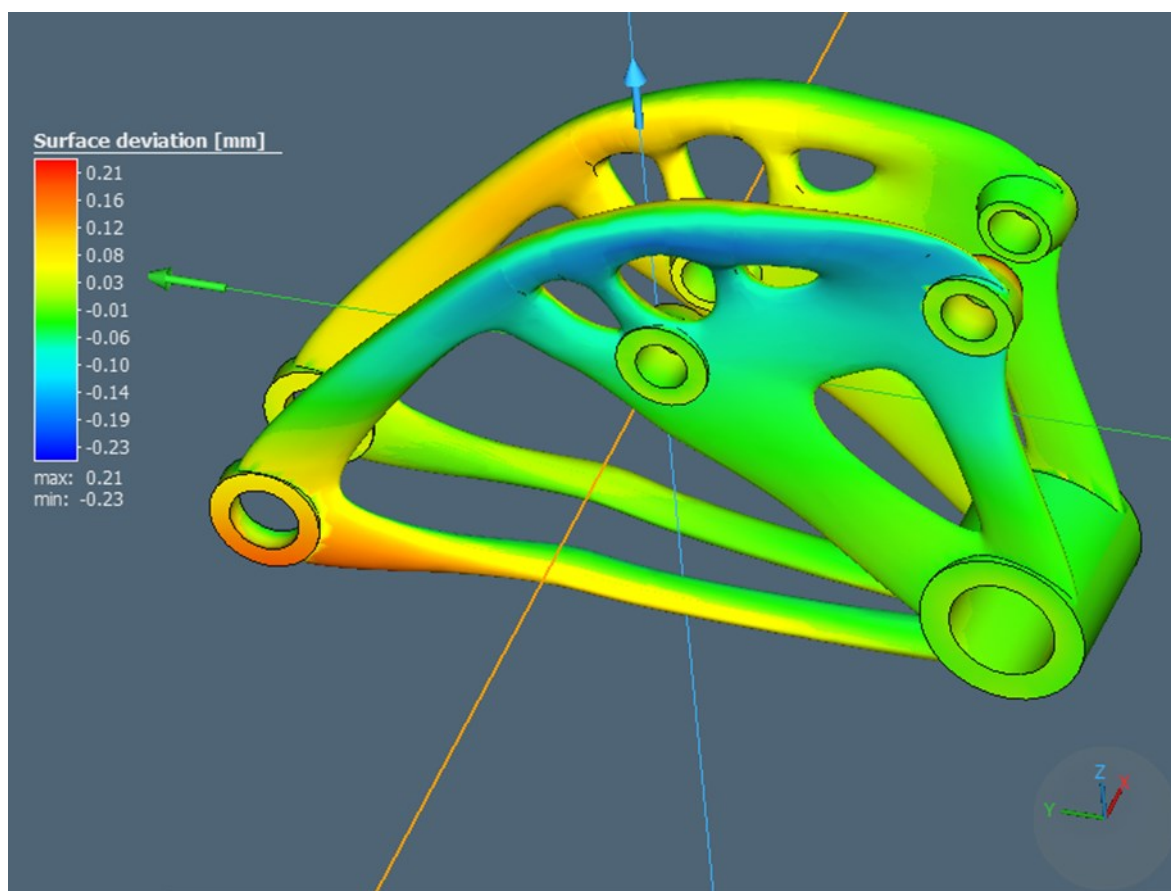
Odstranění podpěr v praxi se provádí pomocí konvenčních technologií obrábění.



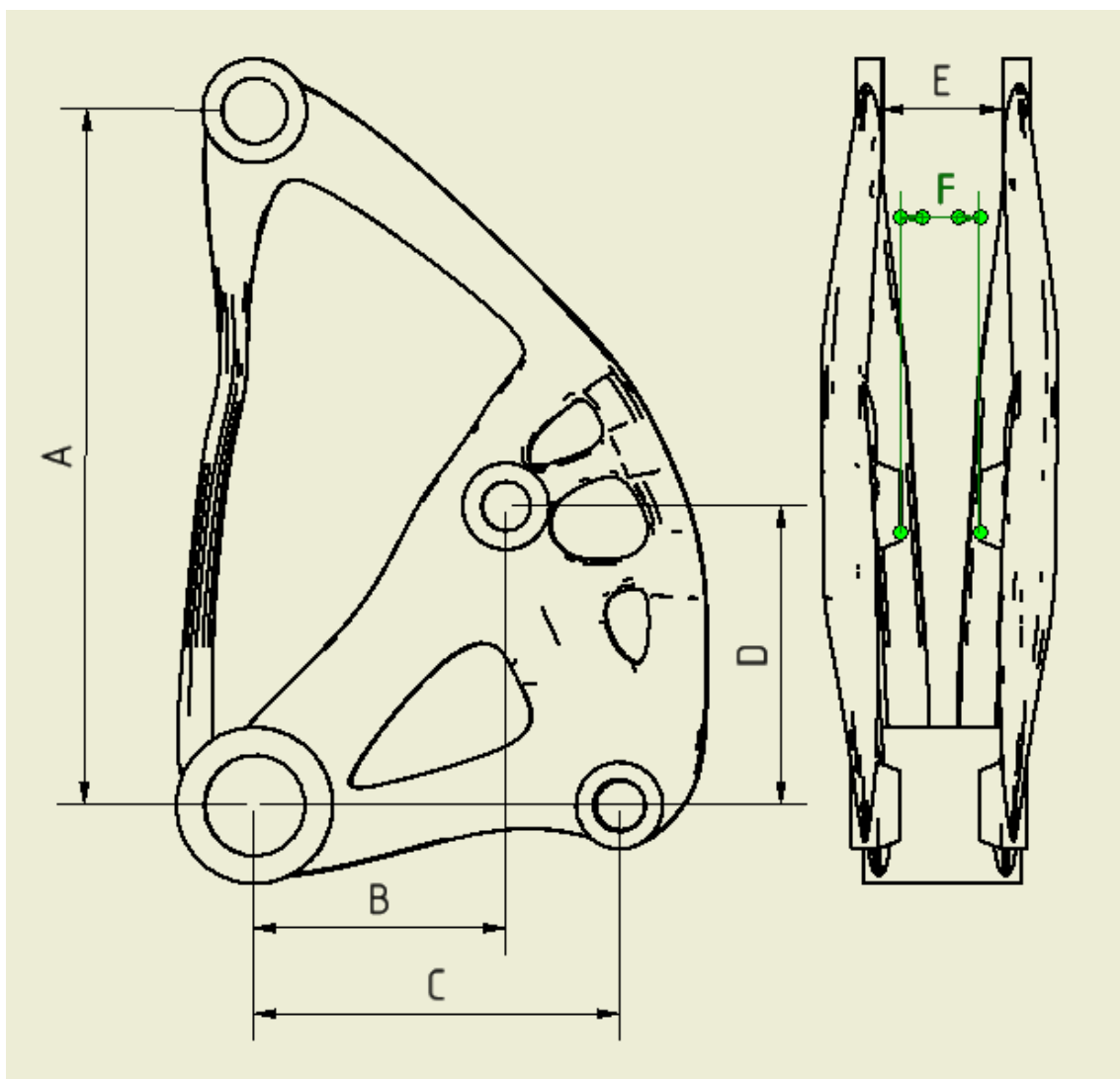
Obrázek 3.28 – Odřezání podpěr

17. Porovnání s výchozím CAD modelem

Tvar modelu je rozměrově odlišný od výkresové dokumentace (viz. tabulka 3.3). Celkově dochází k nárůstu jak v kladných, tak v záporných hodnotách. V kladných hodnotách je nárůst o 0.21 mm a v záporných o 0.23 mm (viz obr. 3.29). Podstatě jde o úchytky, které se musí změřit v simulovaném 3D modelu na důležitých funkčních rozměrech. 3D model se musí dále modifikovat v programu, aby se dosáhlo co nejlepšího výsledku.



Obrázek 3.29 - Porovnání z výchozím CAD modelem



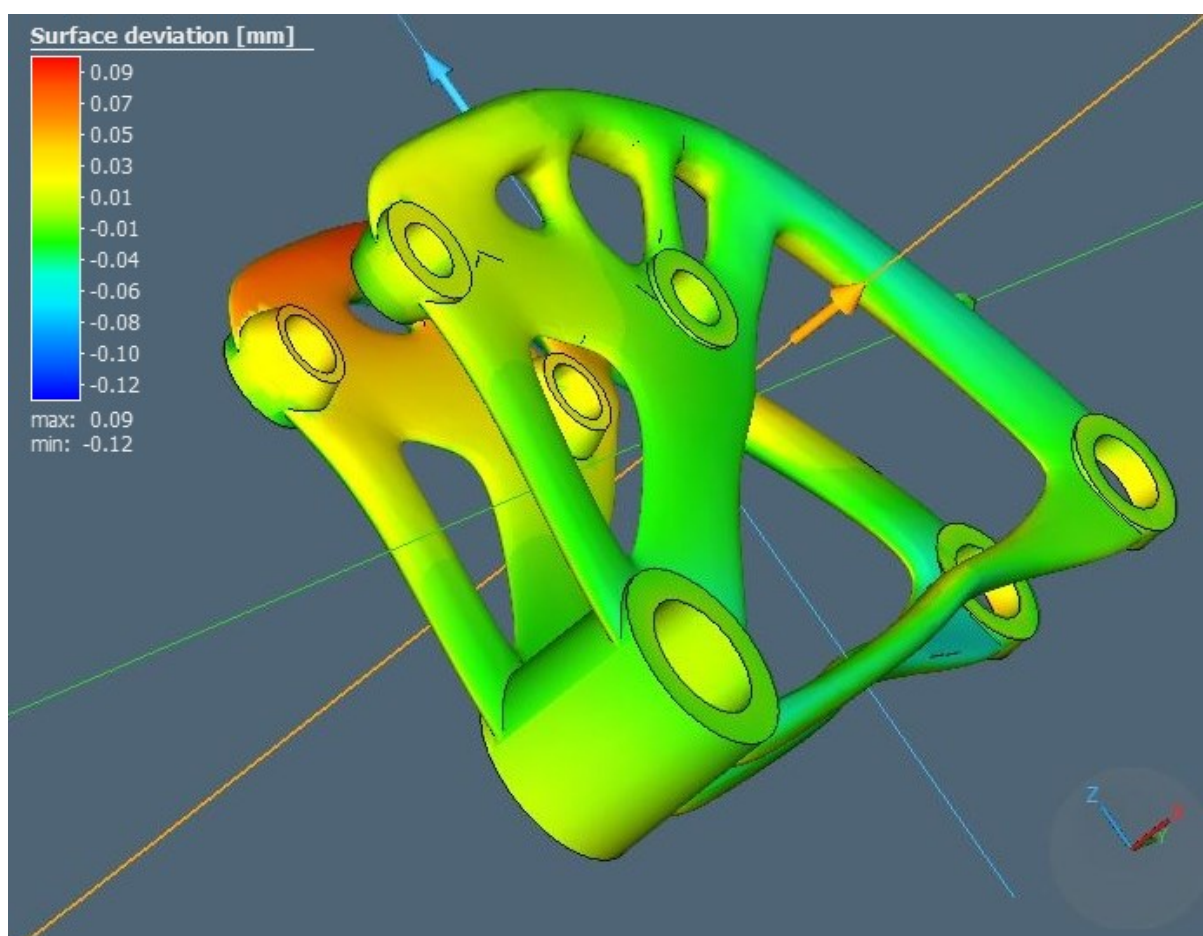
Obrázek 3.30 – Výkresová dokumentace

Rozměř	Jmenovitá hodnota[mm]	Hodnota z výkresové dokumentace[mm]
A	80,24	$80 \pm 0,15$
B	28,98	$28,93 \pm 0,1$
C	42,11	$42 \pm 0,15$
D	34,42	$34,47 \pm 0,15$
E	13,88	$14 \pm 0,1$
F	9,15	$9 \pm 0,1$

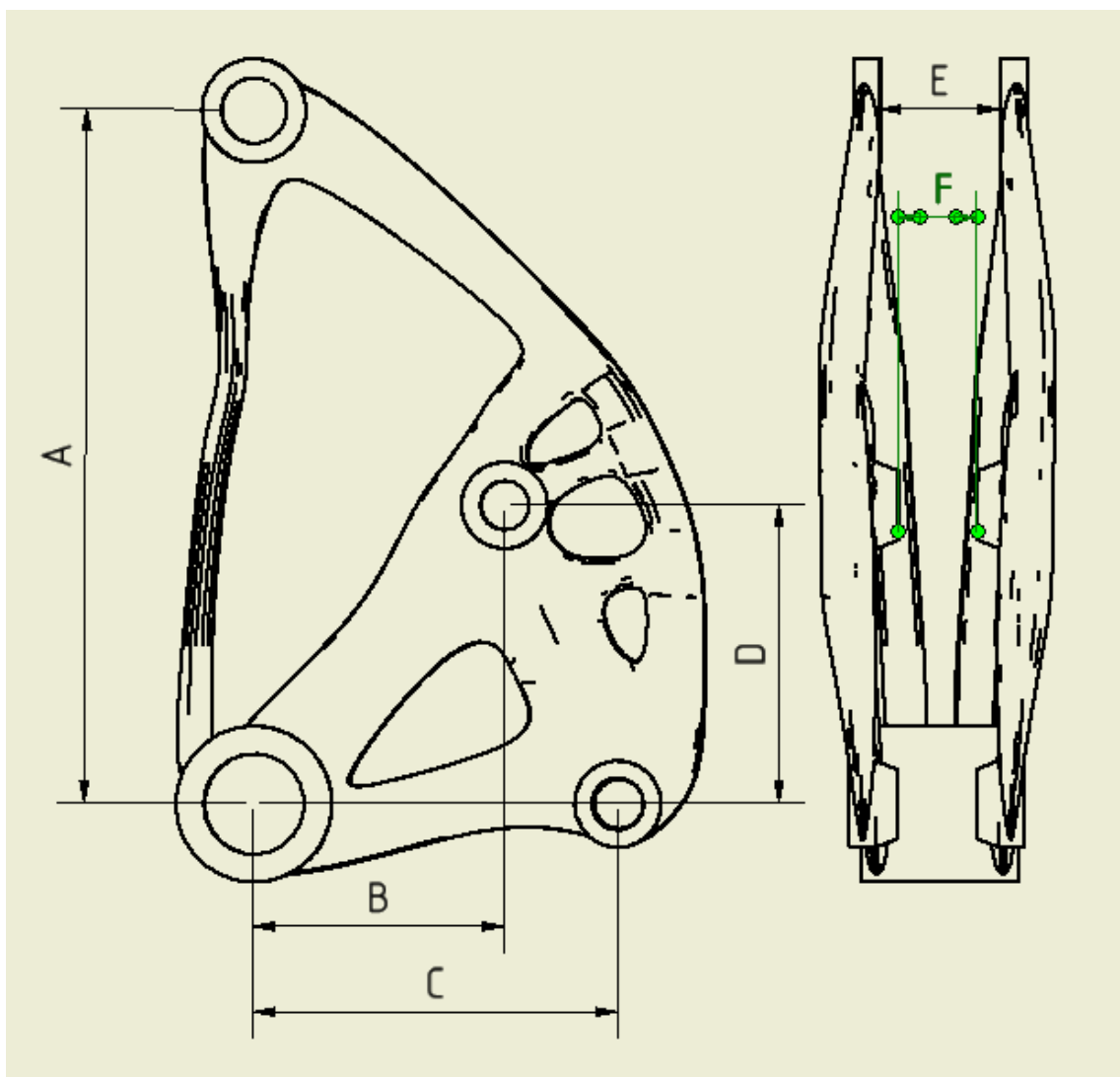
Tabulka 3.3 – Porovnání modelu s výkresovou dokumentací (viz. obr.3.30)
(správné hodnoty označeny zelenou barvou)

3.9.6. Post – processing v programu

Cílem modifikování modelu v programu je dosáhnout odpovídajícího výsledného modelu ztotožněného s výkresovou dokumentací. Z předchozího vyplývá, že model neodpovídá, proto musí být do programu znovu vložen 3D upravený model s předdefinovanou geometrií, který byl získán z předchozí simulace. Následně program ověří geometrii další simulací. Dochází k porovnání výchozího CAD modelu se simulovaným modelem (viz. obr. 3.31). Výsledky odpovídají výkresové dokumentaci. Model je připraven k tisku.



Obrázek 3.31 – Předdefinovaný tvar modelu.



Obrázek 3.30 – Výkresová dokumentace

Rozměř	Jmenovitá hodnota[mm]	Hodnota z výkresové dokumentace[mm]
A	79,99	$80 \pm 0,15$
B	28,89	$28,93 \pm 0,1$
C	41,97	$42 \pm 0,15$
D	34,47	$34,47 \pm 0,15$
E	14,07	$14 \pm 0,1$
F	8,97	$9 \pm 0,1$

Tabulka 3.4 – Porovnání modelu s předdefinovanou geometrií výkresovou dokumentací (viz. obr. 3.30) (správné hodnoty označeny zelenou barvou)

3.10. Post-Processing (dokončovací operace)

Jedná se o konečnou fázi procesu 3D tisku. Vytisknutá součást je vyjmuta ze zařízení a následuje ořezání od substrátu a odstranění podpůrných konstrukcí. Mnohdy součásti vyžadují pro dosažení kvalitního povrchu a zvýšení životnosti očištění a finální úpravy, jako např. tepelné zpracování, otryskávání, lakování, impregnace, broušení apod. [21]

Tyto úpravy se aplikují po finálním tisku. Mají vliv na vzhled výrobku i mechanické vlastnosti.

3.10.1. Tepelné zpracování

Vhodným tepelným zpracováním je například žíhání. U součástí vyrobených aditivní technologií SLM se tento způsob zpracování příznivě projevuje zvláště ke snížení zbytkového vnitřního napětí materiálu. Pro proces jsou vhodnější vyšší teploty žíhání. [22]

3.10.2. Otryskávání

Tryskání či tzv. pískování je technologie k opracování různých tvrdých povrchů a materiálů proudem jemných částic. Tryskání se nejčastěji využívá v aditivní výrobě k získání celistvého povrchu a snížení drsnosti. Pro odhalení nekonzistentního povrchu se na výrobek aplikuje barevná hmota formou nátěru nebo nástřiku. Výsledkem nekvalitního otryskávání jsou různé fleky a špatné odstíny barvy. Jako nejpoužívanější abraziva jsou ocelová drť, křemičitý písek či struska. Otryskávání se využívá téměř ve všech oborech.

3.10.3. Omílání

Omílání je zvláštní způsob leštění, kterým je dosahováno hladkého povrchu. Úběr materiálu je uskutečňován třením a nárazy leštícího prostředku na povrch součástí. Součást a leštící tělíska se dostávají do vzájemného pohybu otáčením nebo vibrací stroje. Nástrojem je leštící prostředek, který je složen z abrazivního materiálu (kalené ocelové kuličky, keramická, polymerová nebo skleněná omílací tělíska).[21]

4. Technické zhodnocení

K dosažení odpovídajícího, výsledného 3D modelu, bylo použito upravení modelu pomocí topologické optimalizace. Tím bylo ušetřeno, co nejvíce materiálu 316L na 3D tisk. K modelu byly připočítány přídavky na obrábění v místech funkčních ploch, protože 3D tiskárna vyrábí sice přesné modely, ale nemůže se v drsnosti povrchu porovnávat s konvenčními technologiemi obrábění. Nadále se musel 3D model převést do formátu STL, aby program Simufact Additive mohl 3D model zpracovat.

Simufact Additive je velmi intuitivní, ale i rozsáhlý program, v porovnání s jinými programy nijak nezaostává, podporuje velmi užitečné, pokročilé funkce např. cenové kalkulace modelu, výpočet předdefinovaného tvaru pro snížení vnitřního napětí atd.

Dalším faktorem byla orientace modelu, upraveného topologickou optimalizací, k základní desce, která je velmi důležitá při generování podpěr a následně v cenovém rozložení výrobku (viz. tab. 4.1). Proto byly vyzkoušeny v Diplomové práci 3 polohy (viz. obr. 3.20) pro zjištění nejmenšího zbytkového napětí, velikosti deformace, a také pro snížení celkového počtu podpěr na minimum. Ovšem snížení množství podpěr má za následek velký vznik zbytkového napětí a v nejhorším případě zhroucení celého modelu. Proto generování podpěr bylo vypočítáno podle programu a nedocházelo již k úpravám podpěr.

Varianty	Deformace [mm]	Objem podpěr [mm ²]	Zbytkové vnitřní napětí [MPa]	Teoretický čas 3D tisku [hod.]	Orientační Cena [Kč]
Typ A	0,26	8 499,4	620	5,5	3 765
Typ B	1,37	29 625,5	610	5,4	4 532
Typ C	0,73	4 673,4	680	7,2	3 956
Upravený Typ A	0,24	8 573,4	580	5,32	3 393

Tabulka 4.1 – Porovnání parametrů při různé orientaci modelu

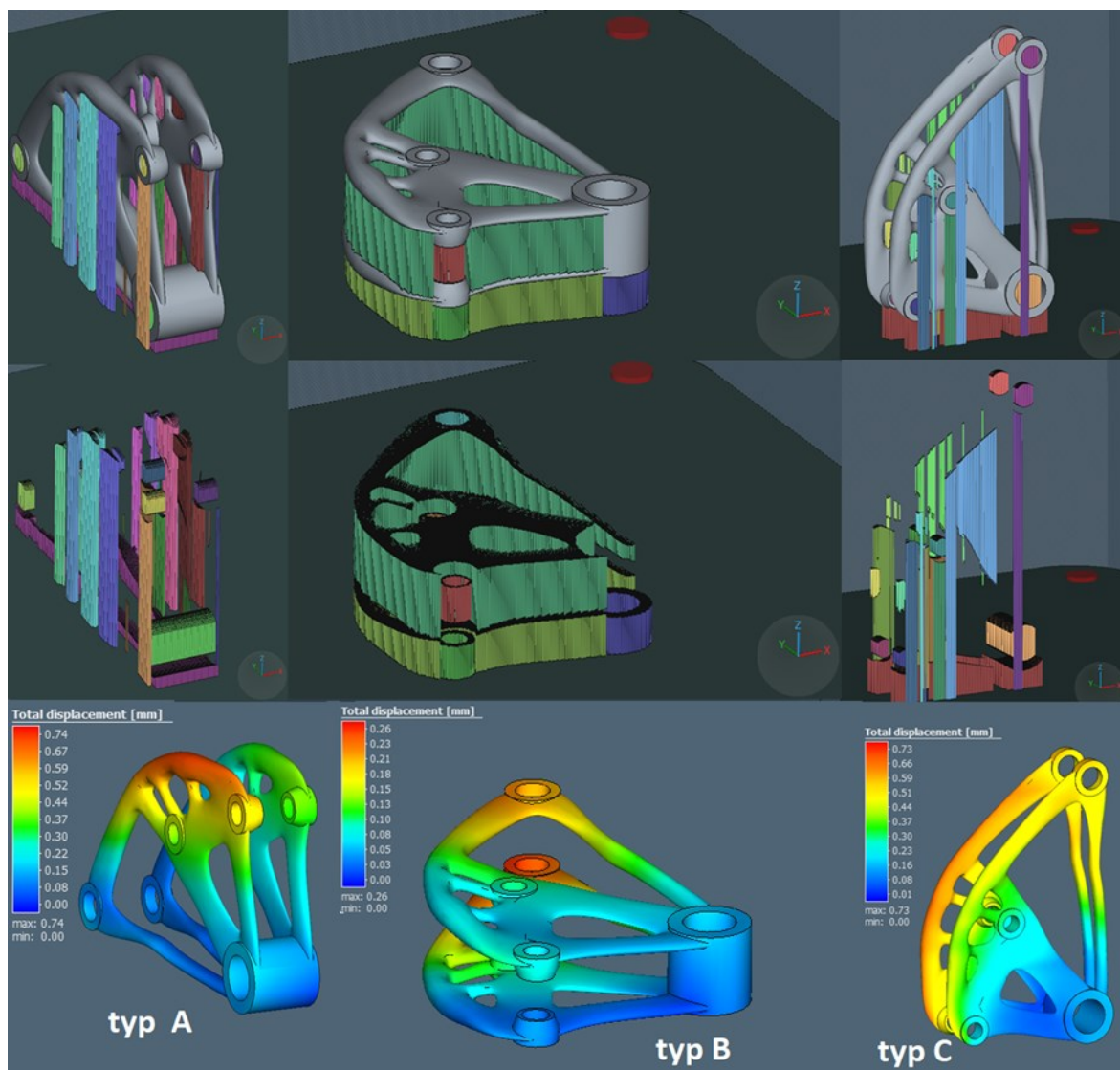
První varianta (Typ A) má vertikální orientaci modelu k základní desce a je k ní otočena delší stranou. U této orientace jsou vykazovány nejnižší hodnoty deformací. Optimálního výsledku bylo dosaženo nejvhodnější orientací modelu a použitím vhodně umístěných podpěr. Přesto tato varianta v rámci dokončovacích operací (tzn. post processing) dopadla v hodnocení hůře než třetí varianta (Typ C), protože využívala více podpěr.

V druhé variantě (Typ B) tvoří největší plocha modelu základnu, která je vodorovně orientována k základní desce. Tato vodorovná orientace se vyznačovala hlavně použitím mnoha podpěr, které však nezaručovaly menší deformace. Varianta v porovnání velikosti deformace a množství podpěr dopadla z uvedených tří možností orientace nejhůře.

Obdobně jako u první varianty (Typ A) je model u třetí varianty (Typ C) orientován vertikálně k základní desce, ale kratší stranou. Výsledkem je nejmenší množství podpěr z uvedených variant. Přestože v teorii je uváděno, že menší množství podpěr znamená vznik větší deformace, u této varianty to není potvrzeno. Deformace, vzniklá malým masivem materiálu v okolí nejvyšších částí 3D modelu, se řadila jako druhá nejmenší. Teoreticky zmenšení deformace by mohlo být dosaženo ještě přidáním podpěry v horní části modelu.

Další část je zaměřena na vznik zbytkových napětí především vlivem rozložení tepla během simulace tisku. Pokud je teplota v modelu vahadla rozložena rovnoměrně a model ochlazován velmi pomalu, může být dosaženo nízkých hodnot zbytkových napětí.

Velmi důležitými metodami pro odstranění nebo zamezení vzniku zbytkových napětí je i optimalizace procesních parametrů jaké jsou výkon, teplota laseru, výška vrstvy, rychlost skenování, strategie tisku, dále použití předehřevu základové desky a prášku, se kterými se musí při nastavování tisku počítat. V praxi nejde dosáhnout plné optimalizace parametrů, protože zde vstupují velké proměnné.



Obrázek 4.1 – Varianty orientace modelu vahadla

Následně, pro simulaci 3D modelu vahadla, byla vybrána první varianta (Typ A), u které je model vertikálně orientován delší stranou k základní desce. Tato varianta vykazovala nejnižší hodnoty deformace při optimálním množství podpěr. V dalším kroku byla vložena do programu kalibrace materiálu 316L a nastavena tloušťka základní desky. Model byl přetransformován na Voxel síť. Simulací byly zjištěny větší hodnoty napětí, které vyvolaly deformaci 3D modelu na tolik, že model rozměrově ani tvarově neodpovídal výkresové dokumentaci. Model bylo nutno opravit novým předdefinováním geometrie tvaru a rozměrů z předchozích výsledků simulace. Tento model je ověřen opět simulací, která prokázala správnost nastavených parametrů. Upravený model odpovídal výkresové dokumentaci.

Po tisku je důležitý post-processing, do kterého by bylo zahrnuto:

- odřezání modelu od základní desky,
- odstranění podpěr,
- kontrola a měření,
- konvenční obrábění,
- tepelné zpracování,
- povrchové úpravy.

Odřezání modelu od základní desky se provádí např. pásovou pilou. Odstraňování podpěr může být problematické, protože struktury jsou vyrobeny ze stejného materiálu jako součást a mají tedy značnou pevnost. Odstraňování musí probíhat opatrně, aby nedošlo k poškození součásti, např. odlomení menších částí. Většinou se provádí technologií konvenčního obrábění. Pro odstranění zbytkových napětí je používáno tepelné zpracování např. žíhání nebo Hot Isostatic Pressing (HIP). Výsledné jakosti povrchu a celistvého vzhledu se dosáhne povrchovou úpravou omíláním a otryskáváním.

V celkovém hodnocení modifikovaný model „vahadla studentské formule“ s předdefinovanou geometrií vykazoval o 7,69% menší deformaci než neupravený 3D model, což mělo přímý vliv na snížení zbytkového napětí o 4,92%. Další výhodou tohoto modelu je časová úspora přibližně 48 minut při 3D tisku, a tím i snížení nákladů na výrobu o cca. 325 Kč. Negativním důsledkem je mírné zvýšení objemu podpěr o 0,87%.

5. Závěr

Hlavním cílem Diplomové práce bylo snížit vnitřní napětí při 3D tisku u předem vybraného topologicky optimalizovaného 3D modelu. S topologickou optimalizací se ušetřilo materiálu 316L, nerezové oceli, a zároveň byla zachována pevnost 3D modelu.

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. První část je věnována teoretickému seznámení s aditivní technologií 3D tisku (fotopolymerací, vytlačováním materiálu FDM, laminováním plátů SL, tryskáním pojivem BJ, řízeným ukládáním energie DED, spékáním práškové vrstvy FDM), a především zbytkovým napětím, které vyvolávají deformace u 3D modelu. Druhá část je zaměřena na simulaci a snížení zbytkového napětí a deformací.

K simulování zbytkového napětí a jeho snížení byl zvolen topologicky optimalizovaný 3D model vahadla studentské formule. Vahadlo je velmi důležitou částí podvozku studentské formule, na které působí velké síly, a jeho uchycení je provedeno s tolerovanými čepy s velmi malou úchylnou. Jedná se o díl nosný a rozměrově přesný, který po 3D tisku bude obráběn, proto byly připočítány přídatky na obrábění ve funkčních rozměrech vahadla.

Pro první snížení zbytkového napětí a deformací byla testována orientace 3D modelu vahadla studentské formule. Z testovaných 3 variant orientace byla vybrána první varianta, která má vertikální orientaci modelu k základní desce, a je k ní otočena delší stranou. Tato varianta vykazovala optimální výsledky oproti průměrným vypočítaným hodnotám, a to ve snížení zbytkového napětí o 2,61%, s tím souvisela deformace, která se razantně snížila o cca 33,05%. Doba 3D tisku se snížila téměř o 12%. S optimálně zvolenou orientací byl 3D model vahadla následně simulován v programu Simufact Additive od společnosti MSC Software, aby byla zjištěna tvarová a rozměrová nepřesnost.

Pro odstranění vzniklých nedostatků, tedy pro zmenšení zbytkového vnitřního napětí a deformací a dosažení shody s výkresovou dokumentací, se musel simulovaný 3D model upravit pomocí předdefinování geometrie. V následné simulaci s předdefinovaným 3D modelem bylo dosaženo kladných hodnot, a to zvýšením množství podpěr v kritickém místě, tedy v nejvyšší části modelu. Takto modifikovaný model, splňující požadavky technické dokumentace, je připraven k tisku. V závěrečné práci byl výsledný model s předdefinovanou geometrií ověřen pouze simulací 3D tisku.

V závěru je navržena tepelná a povrchová úprava vyrobené součásti, vahadla. Doporučenou tepelnou úpravou žíháním nebo Hot Isostatic Pressing (HIP) může být docíleno další snížení zbytkového vnitřního napětí, a otryskáváním a omíláním, zlepšení kvality povrchu a vzhledu.

Diplomová byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

6. Použitá Literatura

- [1] Selective laser melting (SLM): tumblr_mo1746su8l1qk4ealo1_1280.jpg. In: 3D Printig - The Next Billion - Dollar Industry? [online]. 2013 3DvisDesign. [cit. 2019-01-18]. Dostupné z: <http://3dvisdesign.com/3d-printing-the-next-billion-dollar-industry/>
- [2] DOBBS, Sarah et al. SB LTD. [I]The Ultimate Guide To 3D Printing.[/I] London: Dennis Publishing Ltd, 2014, 48 s. ISBN 1-78106-309-5.
- [3] GIBSON, I., D. W ROSEN a B. STUCKER. [I]Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. [/I] New York: Springer, c2010. ISBN 1441911200.
- [4] 3D PRINTING – ADDITIVE [online]. 2018 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/>
- [5] YAN, Chunze, Liang HAO, Ahmed HUSSEIN, Philippe YOUNG a David RAYMONT. Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. Materials [online]. 2014, 55, 533-541 [cit. 2019-12-20]. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.10.027. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913009540>
- [6] BREMEN, Sebastian, Wilhelm MEINERS a Andrei DIATLOV. Selective Laser Melting. Laser Technik Journal [online]. 2012, 9(2), 33-38 [cit. 2019-12-21]. DOI: 10.1002/latj.201290018. ISSN 16137728. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/latj.201290018>
- [7] WANG, Di, Yongqiang YANG, Ruicheng LIU, Dongming XIAO a Jianfeng SUN. Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM). Journal of Materials Processing Technology [online]. 2013, 213(10), 1734-1742 [cit. 2019-12-21]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.05.001. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013613001490>
- [8] STRANO, G., L. HAO, R. M. EVERSON a K. E. EVANS. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2013, 66(9-12), 1247-1254 [cit. 2019-12-21]. DOI: 10.1007/s00170-012-4403-x. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4403-x>

- [9] SU, Xubin, Yongqiang YANG, Di WANG a Yonghua CHEN. Digital assembly and direct fabrication of mechanism based on selective laser melting. Rapid Prototyping Journal [online]. 2013, 19(3), 166-172 [cit. 2019-12-21]. DOI: 10.1108/13552541311312157. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552541311312157>
- [10] LI, C., et al. A Temperature-Thread Multiscale Modeling Approach for Efficient Prediction of Part Distortion by Selective Laser Melting. In: Conference: The 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, At Austin, TX. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-95-Li.pdf>
- [11] Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT[online]. [vid.2018-01-25]. Dostupné z: <https://www.ilt.fraunhofer.de/en/profile.html>
- [12] WITHERS, P.J. a H.K.D.H. BHADESHIA. Residual stress. Part 1 –Measurement techniques. Materials Science and Technology[online]. 2001, 17(4), 355–365. ISSN0267-0836. Dostupné z:doi:10.1179/026708301101509980
- [13] Italinox. Italinox [online]. [cit. 22.04.2020]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/>
- [14] Allen, S. and D. Dutta, On the computation of part orientation using support structures in layered manufacturing, Technical Report. UM-MEAM-TR-94-15, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbour.
- [15] A Study of Part Orientation in Rapid Prototyping. A Study of Part Orientation in Rapid Prototyping. 2014.
- [16] Rapid prototyping and manufacturing technology [online]. 2014 [cit. 2020-04-14]. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6075759>
- [17] What-is-3d.printing [online]. 2019 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/what-is-3d.printing>
- [18] Simufact additive tutorial: Simufact tutorial. 2019. © simufact engineering gmbhCopyright © simufact engineering.
- [19] Začínáme s 3d tiskem kovu. <https://www.konstrukter.cz> [online]. 2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu>
- [20] Ocelex. OCELEX spol. s.r.o. [online] [Cit. 7.5.2018]. Dostupné z: <http://ocelex.sk/>

Materiálové listy

- [21] UHLMANN, E., BERGMANN, A., GRIDIN, W.; Investigation on Additive Manufacturing of tungsten carbide-cobalt by Selective Laser Melting; [online]; 15th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry; 2015; www.sciencedirect.com
- [22] VAVERKA, Ondřej, Daniel KOUTNÝ, Radek VRÁNA, Libor PANTĚLEJEV a David PALOUŠEK. Effect of heat treatment on mechanical properties and residual stresses in additively manufactured parts. 2018.
- [23] SENTHILKUMARAN. Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering
- [24] 3D tisk. <https://www.3d-tisk.cz> [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- [25] Vat-photopolymerization. <https://www.plm.automation.siemens.com/> [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/vat-photopolymerization/53338>
- [26] Material-extrusion. <https://engineeringproductdesign.com> [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-extrusion/>
- [27] Material-jetting. <https://www.3dhubs.com> [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [28] LEONG SING, Swee. Material-jetting. <https://www.researchgate.net/> [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/fig4_326185196
- [29] Sheet-lamination. <https://www.3dprinting.lighting> [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.3dprinting.lighting/3d-printing-technologies/sheet-lamination/>
- [30] Directed-energy-deposition. <https://www.3dnatives.com> [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
- [31] powder-bed-fusion. <https://engineeringproductdesign.com> [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/powder-bed-fusion/>

- [32] Electron-beam-melting. <https://www.additively.com> [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting#read-more>
- [33] TURKER, M. D. GODLINSKI, D. PETZOLDT, F. Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. *Materials Characterization*, , Issue 12, December 2008,
- [34] Direct Energy Deposition DED. <http://www.beam-machines.com> [online]. Creative Commons, 2016 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://www.beam-machines.com> •Follow us on Twitter: https://twitter.com/BeAM_3DPrinting Metal 3D Printing
- [35] Paul Plaza. 3D modeling. <https://www.cadcrowd.com> [online]. Creative Commons, 2018 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.cadcrowd.com/blog/additive-manufacturing-materials-in-2018-beyond-3d-printing/>
- [36] Selective-laser-melting. <http://r-riparabile.com> [online]. twi-global, 2018 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://r-riparabile.com/selective-laser-melting/>
- [37] Selective-laser-melting. <https://www.flickr.com> [online]. 2019 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/twiltd/15153042587>
- [38] Multi Jet Fusion-MJF. <https://geomiq.com/> [online]. 2020. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://geomiq.com/multi-jet-fusion-mjf/>
- [39] PRUSA, Josef. Multi Jet Fusion-MJF. <https://josefprusa.cz/> [online]. 2014 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/hp-multi-jet-fusion-3d-tiskarna-co-z-toho/>
- [40] F. Calignano. Optimalizace návrhu podpor pro převislé struktury: F. Calignano. <https://www.sciencedirect.com> [online]. Elsevier, 2014 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914005755>
- [41] Powder 316L. <https://www.researchgate.net> [online]. Elsevier, 2014 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-micrograph-of-316L-powder-and-particle-size-distribution-curve_fig1_282474949

7. Použité obrázky

Obrázek 2.1 – Dělení technologie aditivní výroby

Obrázek 2.2. A) Stereolitografie. B) Digitální zpracování světla

Obrázek 2.3 Vytlačování materiálu

Obrázek 2.4 - Schéma tiskárny tryskání materiálu

Obrázek 2.5 – Schéma tiskárny na laminování plátů

Obrázek 2.6 – Schéma principu tisku Tryskání pojiva

Obrázek 2.7 – Schéma tiskárny na řízené ukládání energie

Obrázek 2.8 – Použití technologie DED

Obrázek 2.9 - Powder Bed Fusion

Obrázek 2.10 - Ukázka výroby s přesahem

Obrázek 2.11 – Složitost tvarů

Obrázek 2.12 – Schéma procesu SLM

Obrázek 2.13 – Porovnání průměru laserového paprsku s jinými subjekty

Obrázek 2.14 – Proces MJF

Obrázek 3.1 - Teplotní gradientní mechanismus

Obrázek 3.2 – Správná orientace modelu

Obrázek 3.3 - Řada typů podpěrných struktur

Obrázek 3.4 – Vizualizace převisu

Obrázek 3.5 - Schodišťový efekt při stavění

Obrázek 3.6 – Orientace tisku kalibračních konzolí v metodě 1.

Obrázek 3.7 – Řez kalibračních konzolí.

Obrázek 3.8 – Měření zakřivení v ose Z

Obrázek 3.9 – Měření a simulované odřezání kalibrační konzolí.

Obrázek 3.10 – Orientace metody 2 při kalibraci

Obrázek 3.11 – Kalibrační formulář materiálu 316L

Obrázek 3.12 – Vahadlo studentské formule

Obrázek 3.13 - Prášek nerezové oceli 316L

Obrázek 3.14 - Renishaw AM40019

Obrázek 3.15 – Nový program

Obrázek 3.17 - Definice projektu

Obrázek 3.18. - Vložení 3D modelu

Obrázek 3.19 - Generování podpěr

Obrázek 3.20 - Základní plát

Obrázek 3.22 - Vložení kalibrace

Obrázek 3.23 – Volba odstranění podpěr

Obrázek 3.24 – Objem použitých podpěr

Obrázek 3.25 - Voxel mesh

Obrázek 3.26 – Tisk modelu v simulaci

Obrázek 3.27 – Odřezání modelu od základní desky

Obrázek 3.28 – Odřezání podpěr

Obrázek 3.29 - Porovnání z výchozím CAD modelem

Obrázek 3.30 – Výkresová dokumentace

Obrázek 3.31 – Předdefinovaný tvar modelu.

Obrázek 4.1 – Varianty orientace modelu kyvadla

8. Tabulky

Tabulka 3.1 - Chemické vlastnosti materiálu

Tabulka 3.2 – Mechanické vlastnosti materiálu

Tabulka 3.3 – Porovnání modelu s výkresovou dokumentací

Tabulka 3.4 – Porovnání modelu s předdefinovanou geometrií výkresovou
dokumentací

Tabulka 4.1 – Porovnání parametrů při různé orientaci modelu